



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKY

INSTITUTE OF PHYSICS

**VYUŽITÍ AKUSTICKÝCH METOD PRO
POSOUZENÍ VLIVU SLOŽENÍ CEMENTOVÝCH
KOMPOZITŮ NA PRŮBĚH DEGRADACE
VYVOLANÉ ZVÝŠENOU TEPLOTOU**

USE OF ACOUSTIC METHODS FOR ASSESSING THE INFLUENCE OF THE
COMPOSITION OF CEMENT COMPOSITES ON THE COURSE OF DEGRADATION
CAUSED BY HIGH TEMPERATURE

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Richard Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. ZDENĚK CHOBOLA, CSc.

ABSTRAKT

Cílem této práce je optimalizace akustické nedestruktivní metody (NDT) Impact-Echo (IE) jako doplňujícího diagnostického nástroje pro posuzování betonových konstrukcí vystavených vysokým teplotám. Běžně používané diagnostické postupy v případě betonové konstrukce zasažené požárem se nejčastěji omezují na odebrání jádrových vývrtů in-situ a následné zkoušení takto odebraných vývrtů pomocí destruktivních zkoušek. Metoda Impact-Echo dovoluje nedestruktivní zkoušení různě degradovaných zkušebních těles a betonových konstrukcí, nicméně její využití pro posuzování teplotně degradovaných cementových kompozitů není v praxi téměř vůbec používané. Mnohé studie přitom naznačují, že právě metoda Impact-Echo je jedna z nejvhodnějších nedestruktivních metod pro posuzování míry degradace zvýšenou teplotou. Experimentální část práce se skládá ze tří hlavních etap, kdy první etapa se věnuje výrobě zkušebních těles různých receptur a jejich následné degradaci zvýšenou teplotou a zkoušení metodou IE a referenčními destruktivními a nedestruktivními metodami. Druhá etapa se skládá z výroby železobetonového elementu se zabudovanými termočlánky a jeho následnou nehomogenní degradací lokálním zdrojem zvýšené teploty. Takto připravený řízeně degradovaný prvek obsahuje všechny stupně teplotně degradovaného betonu, testovaného v první etapě. Následné testování se skládá z ověření standardních postupů v oblasti akustického NDT se současným využitím postupů měření experimentální modální analýzy. V rámci třetí etapy je cílem interpretace měřených dat z obou předešlých částí, ověření, zda lze v rámci uzavřeného prvku mezi sebou rozlišit teplotně degradované oblasti, popřípadě míru tepelné degradace betonu. Na základě těchto výsledků byl stanoven optimální postup testování a byly stanoveny základní předpoklady pro vytvoření stupňů poškození betonu zvýšenou teplotou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Impact-Echo, Vibroakustika, Nedestruktivní testování, Vysoké teploty, Beton, Degradace

ABSTRACT

The aim of this work is to optimize the acoustic nondestructive method (NDT) Impact-Echo (IE) as a complementary diagnostic tool for the assessment of concrete structures exposed to high temperatures. Commonly used diagnostic procedures for concrete structures affected by fire are most often limited to in-situ core drilling and subsequent testing of the drilled holes by destructive testing. The Impact-Echo method allows non-destructive testing of variously degraded test specimens and concrete structures, but its use for the assessment of temperature-degraded cementitious composites is hardly ever used in practice. Many studies suggest that Impact-Echo is one of the most suitable non-destructive methods for assessing the rate of degradation by elevated temperature. The dissertation work consists of three main stages, where the first stage is devoted to the production of test specimens of different mixtures and their subsequent degradation by elevated temperature and testing by the IE method and by reference destructive and non-destructive methods. The second stage consists of manufacturing a reinforced concrete element with built-in thermocouples and its subsequent inhomogeneous degradation by a local source of elevated temperature. The controlled degraded element thus prepared contains all grades of thermally degraded concrete tested in the first stage. Subsequent testing consists of verification of standard procedures in the field of acoustic NDT with simultaneous use of experimental modal analysis. In the third stage, the objective is to interpret the measured data from both previous parts, to verify whether within the closed element temperature-degraded areas can be distinguished from one another, or the degree of thermal degradation of concrete. Based on these results, the optimal testing procedure was determined and the basic assumptions for the creation of degrees of damage of the concrete by increased temperature were determined.

KEYWORDS

Impact-Echo, Vibroacoustic, Nondestructive testing, High temperatures, Concrete, Degradation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Richard Dvořák *Využití akustických metod pro posouzení vlivu složení cementových kompozitů na průběh degradace vyvolané zvýšenou teplotou*. Brno, 2020, 146 s., 162 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Zdeněk Chobola, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem *Využití akustických metod pro posouzení vlivu složení cementových kompozitů na průběh degradace vyvolané zvýšenou teplotou* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne

Ing. Richard Dvořák
autor práce

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

Ing. Richard Dvořák
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Při absolvování bakalářského a magisterského studijního programu jsem získal základy v oblasti fyzikálně materiálového inženýrství, které však byly stále oddělené od mých koníčků a považoval jsem je spíše jako základ pro úspěšné zaměstnání. V průběhu doktorského studia jsem však měl dostatek času, bohatou instrumentální základnu a kolegiální podporu, která mi napomohla se více rozvinout a učit se. Díky tomu jsem byl schopný nejen vypracovat tuto práci, ale zároveň si celé technické odvětví i osobně oblíbit. Zjistil jsem, že mě návrh experimentů, vytváření předpokladů a jejich následné ověřování či vyvracení začalo bavit a získal jsem nadšení řešit technické výzvy. Vědecká práce je založená na sdílení zkušeností, informací a výsledků, což je na mezinárodní úrovni asi ta nejpříjemnější odměna – že vaše práce rezonuje napříč světem, byť v malém měřítku vědeckých publikací, na konferencích, či mezi kolegy v laboratoři. Tento přerod, který se převážně udál v mé hlavě, byl však umožněn hlavně díky klíčovým osobám, které mi to celé umožnily. V tomto ohledu mi doktorské studium mnoho dalo a vyrostl jsem.

Chtěl bych tedy poděkovat svým rodičům, kteří mi dali životní průpravu, která ctí laskavost, vzájemný respekt a lidskou práci. Bez jejich podpory a výchovy bych nebyl schopný tuto práci zrealizovat. Dále bych chtěl poděkovat své manželce, Štěpánce, která je mi zdrojem energie, optimismu a nadšení, že každá věc na světě má řešení. I když jsem občas pohlcený prací a zapomínám se v laboratoři, nakonec si vždy pro mě najde pochopení. Velký dík patří mým kolegům doc. Mgr. Liborovi Topolářovi, Ph.D. a panu prof. Ing. Lubošovi Pazderovi, CSc., kteří mi byli rádci i kritickými oponenty mé práce napříč všemi roky doktorského studia. Bez jejich kritického přístupu a mírné nadsázky bych spoustu rozhodnutí nebyl schopný učinit. S tím souvisí i velmi schopné mladé podhoubí doktorandů na ústavu stavebního zkušebnictví, ústavu stavebních hmot a dílců a laboratoře přenosu tepla při fakultě strojní. Dále musím poděkovat vedoucímu ústavu fyziky a zároveň mému odbornému školiteli prof. RNDr. Zdeňkovi Chobolovi, CSc., za odborné vedení a vstřícný přístup při zpracování práce a za možnost účasti na výzkumném projektu GAČR GA1602261S. Neméně děkuji i dalším pracovníkům ústavu fyziky, ústavu zkušebnictví a ústavu stavebních hmot a dílců za kooperaci a odbornou průpravu při návrhu experimentů a zkušebních postupů.

OBSAH:

Úvod	10
1 Teoretická část	11
1.1 Degradace betonu vysokým teplotami	11
1.1.1 Vliv kameniva na proces degradace.....	13
1.1.2 Degradace cementového tmele	14
1.1.3 Explosivní odprýskávání („Explosive spalling“)	15
1.1.4 Dodatečné dotvarování („Transient creep“)	15
1.1.5 Vliv způsobu teplotního zatěžování.....	17
1.2 Technická diagnostika	18
1.2.1 Diagnostika po požáru	19
1.2.2 Stavební konstrukce a materiály z pohledu legislativy	21
1.3 Nedestruktivní testování	22
1.3.1 Akustické trasování	22
1.3.2 Impact-Echo	22
1.3.3 Rychlost průchodu ultrazvuku	23
1.3.4 Akustická emise.....	23
1.4 Princip pulsně kompresních vibroakustických metod	25
1.4.1 Šíření mechanických vln	25
1.4.2 Vliv vlhkosti a teploty	28
1.4.3 Výpočetní vztahy	29
2 Cíle práce	32
3 Zvolené metodiky testování	33
3.1 Plán zkoušení a etapy výzkumu	33
3.2 Použité metody pro testování	35
3.2.1 Rychlost průchodu ultrazvuku	35
3.2.2 Tvrdoměrné testování	36
3.2.3 Destruktivní zkoušky	37
3.2.4 Rentgenová difrakční analýza	37
3.2.5 Tlaková rtuťová porozimetrie	38
3.2.6 Georadar.....	39
3.2.7 Impedanční spektroskopie.....	40
3.2.8 Buzení pseudonáhodným signálem (MLS)	41
3.2.9 Princip metody Impact-Echo (IE)	42
3.2.10 Piezoelektrické senzory.....	43

3.3	Softwarové nástroje a programy	43
3.3.1	Rychlá Fourierova transformace	44
3.3.2	Spektrální okna	45
3.3.3	Časově frekvenční transformace	46
3.3.4	Funkce frekvenční odezvy	47
3.3.5	Koeficient korelace	51
4	Experimentální část.....	53
4.1	Kalibrace vybraných metod	53
4.1.1	Záznamové zařízení pro testování.....	53
4.1.2	Stanovení vlhkosti měřených vzorků	54
4.1.3	Vliv vlhkosti na rezonanční frekvenci	55
4.1.4	Kladívko se snímačem	56
4.1.5	Typy testování plošného prvku.....	60
4.2	Testy na prostém betonu	63
4.2.1	Příprava zkušebních těles.....	64
4.2.2	Testování pomocí vybraných metod	65
4.2.3	Korelace měřených hodnot	88
4.2.4	Vybrané korelační diagramy	90
4.2.5	Dílčí závěr.....	93
4.3	Testy na plošně vyztuženém železobetonovém prvku.....	93
4.3.1	Návrh zkušební desky	94
4.3.2	Výroba zkušební desky.....	96
4.3.3	Průběh experimentu.....	98
4.3.4	Testování desky pomocí Impact-Echo metody	103
4.3.5	Modální analýza desky.....	105
4.3.6	Vyhodnocení akustického testování	107
4.3.7	Testování pomocí georadaru	116
4.4	Kategorizace teplotní degradace	118
5	Diskuse k výsledkům.....	122
6	Závěr	125
7	Bibliografie.....	127
8	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	139
9	Seznam tabulek	142
10	Seznam obrázků.....	143
11	Přílohy.....	147

11.1	Rezonanční frekvence testovaných receptur.....	147
11.2	Srovnání CWT a FFT napříč teplotami	149
11.3	Využití IE pro sledování sebehojení.....	152
11.4	Korelace mezi jednotlivými měřeními.....	155
11.5	Modální analýza – obecné grafy	160
11.6	Testy na jednoduše vyztužených prvcích	161

Úvod

Diagnostika stavebních konstrukcí pomocí nedestruktivních metod testování je aktuální téma, které nezávisle na sobě řeší více výzkumných institucí na celém světě [1; 2; 3; 4; 5]. Různých metod nedestruktivního testování vznikala v průběhu minulého století celá řada. Jejich další využití bylo umožněno s nástupem mikroprocesorů a vysokofrekvenčních záznamových jednotek, které dovolují záznam velkého objemu dat.

V oblasti sledování stavu konstrukce existuje celé technické diagnostické odvětví „condition monitoring“, čili monitorování stavu konstrukce. V oblasti kontrolních zkoušek, například mostních těles či dálničních úseků, jsou metody tohoto odvětví používány i ve stavitelství. Součástí tohoto přístupu je možnost průběžné kontroly daného prvku, kdy je ukládána historie jeho stavu, díky čemuž lze efektivně předpovídat možnost poruchy, potřeby pro opravu, revizi či vyřazení daného prvku z provozu ještě dřív, než nastane první porucha. Podstatným prvkem tohoto přístupu je možnost nedestruktivně testovat stav dané konstrukce. V případě že známe historii stavu dané konstrukce a při použití spolehlivých metod testování, je posouzení v čase relativně snadné a vypovídající. Pokud však neexistuje předešlé měření konstrukce, je použití nedestruktivních metod testování omezeno na přibližné stanovení vlastností konstrukce, které však mohou být ovlivněny mnoha faktory, které například nemusejí souviset s pravou příčinou degradace. V této oblasti se projeví právě zvolené akustické nedestruktivní metody testování jako velmi vhodné, protože jsou schopné v různé frekvenční oblasti postihnout rozličné typy poškození – lokalizaci kaveren a delaminaci, detekci prasklin a měření jejich hloubky, ale i stanovování stavu materiálu například po degradaci vlivem zmrazovacích cyklů, působení kyselin, solí či vysokých teplot.

Použití akustických metod pro stanovení míry degradace materiálu je dáno změnou parametrů, které ovlivňují akustickou odezvu. Mezi tyto parametry počítáme převážně rychlost zvuku v daném médiu, objemovou hmotnost, modul pružnosti a jiné. Pokud se tyto vlastnosti v průběhu degradace mění, pak lze i akustickými metodami poznat změnu. V oblasti teplotně degradovaného betonu se v mnoha studiích přistupovalo pouze k prostému tlačnému nevyztuženému betonu, který je ale v konstrukčním stavitelství používán spíše v omezené míře, ovšem nikoliv v míře zanedbatelné.

V oblasti například tunelů jsou například průřezy sekundárního ostění zatížené převážně v tlačné oblasti, podobně i cementobetonové vozovky v tunelech jsou po dobu své životnosti zatížené převážně tlakem. V nově stavěných tunelech se velmi často přistupuje k řešení vozovek pomocí cementobetonových krytů, hlavně díky jejich nižší náročnosti na údržbu a menšímu dotvarování v porovnání s asfaltovými kryty. Pokud se zároveň podíváme na požární křivky navrhované pro tunely, jedná se o nejprísnejší teplotní křivky s nejstrmějším nárůstem teploty a nejvyššími teplotami dosahujícím až k hodnotám 1370 °C, a to už po 5 minutách od začátku požáru [6]. Tato oblast testování se tedy nabízí pro aplikaci akustických nedestruktivních metod testování, které jsou schopné rozpoznat míru poškození. Cílem této práce je ověřit schopnost akustických metod pro stanovení míry degradace či změny akustických parametrů teplotně degradovaného betonu. Je snahou jednotlivá měření akustických parametrů, jako jsou například rychlost zvuku v materiálu, rezonanční frekvence, či akustická impedance, převést pomocí kalibračních vztahů na změnu fyzikálně mechanických vlastností, jako jsou pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, či modul pružnosti.

1 Teoretická část

Beton je celosvětově nejvíce používaným stavebním konstrukčním materiálem [7; 8; 9; 10]. Tuto pozici má díky své bohaté variabilitě užitných vlastností, které lze díky vhodné volbě použitých vstupních surovin navrhovat pro široké spektrum stavebních aplikací. Z pohledu fyzikálně-mechanických vlastností se jedná o velice odolný uměle vyrobený kompozit, schopný odolávat přírodním i antropogenním podmínkám, přenášet značné tlakové napětí a lze jej přizpůsobovat do různých konstrukčních tvarů jak v monolitické výstavbě, tak v případě prefabrikace. Díky široké paletě pojiv, plniv, příměsí, přísad a vláken se dá navíc navrhnout jeho složení pro různé stupně vlivu prostředí, čímž je tento konstrukční materiál přizpůsobován své aplikaci a předpokládanému způsobu zpracování a navržené zátěži. Jeho pevnosti v tahu dosahují přibližně 10 % pevností v tlaku [11], proto se betonové konstrukce vyztužují betonářskou výztuží. Zásaditý charakter betonu zároveň umožňuje alkalicky pasivovat ocelovou výztuž a chránit ji tak proti vnějším vlivům jako je vliv vlhkosti, chloridů apod. Betonářskou výztuž lze rozdělit na výztuž konstrukční, která pouze pomáhá formovat výsledný tvar a směřuje hlavní výztuž, která má statickou funkci a přenáší tahové síly, a je tedy schopná pokrýt tento nedostatek prostého betonu.

Kvalitně provedená, únosná a v čase odolná konstrukce, je výsledkem souhry materiálového inženýrství, projekce a správné realizace. Právě samotná realizace a projekce jsou z celého řetězce výroby navrhnuté konstrukce nejrizikovějšími částmi. Pro následné opravy, udržování a prodlužování životnosti stavebních konstrukcí je klíčovým prvkem diagnostika. Jedná se o soubor metodických kroků, které vedou k detekci vady či poruchy. Na základě provedené diagnostiky, kdy je definována vada, porucha či míra degradace, lze stanovit její vliv na celou konstrukci [12; 13].

Tato práce se zaměřuje na posouzení teplotně degradovaného betonu pomocí akustických nedestruktivních metod, čímž spadá do oblasti nedestruktivního testování materiálů a konstrukcí. Akustické metody testování zároveň poskytují neinvazivní způsob testování, který lze relativně spolehlivě použít i v oblasti stavební diagnostiky. Této oblasti se věnuje více autorů právě díky komplexním procesům, které v případě teplotní degradace v betonu nastávají.

1.1 Degradace betonu vysokým teplotami

Beton je pevný nespalitelný materiál s relativně vysokou tepelně akumulací schopností (měrná tepelná kapacita c standardního prostého betonu je $1020 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Pokud není vyplněn hořlavými příměsemi, vlákny, neprodukuje při zvýšené teplotě kouř, ale dochází v něm k fyzikálně mechanickým a fyzikálně chemickým změnám. Tyto změny pak v průběhu zvyšování teploty různou měrou ovlivňují materiálové vlastnosti betonu a různými způsoby snižují jeho únosnost. Odolnost betonu vůči této degradaci je dána složením zatěžovaného betonu, hutností a homogenitou betonu, a rovněž intenzitou teplotního zatížení během požáru.

V průběhu teplotního zatěžování se uplatňuje více mechanismů degradace, které se mohou a nemusí projevit vzhledem k okrajovým podmínkám, které můžeme rozdělit do následujících bodů:

- složení betonového kompozitu,
- aktuálním stav betonu (daný prvek může být degradován i jinými činiteli kromě vysoké teploty),
- obsah fyzikálně vázané volné vody a chemicky vázané vody,

Tyto základní parametry definují reakci betonové struktury při vystavení vysokým teplotám. Rozsah teplot, které mohou poškodit betonovou strukturu, lze stanovit pomocí Tab. 1. První výrazné změny se začínají projevovat při teplotách 100 °C, kdy dochází k odpařování fyzikálně vázané vody. Zároveň může docházet k rozpadu různých druhů hydrátů, kde se voda při této teplotě začíná uvolňovat ze struktury. Příkladem může být například ettringit, který se rozpadá v teplotní oblasti 120–200 °C [14]. Zároveň se začíná projevovat první část rozkladu CSH (z ang. „calcium silica hydrate“) gelů a sádrovce. Navzdory těmto počátečním změnám z pohledu mechanických vlastností nedochází k tak výraznému poklesu například pevnosti v tlaku, či pevnosti v tahu nebo statického modulu. Výraznější pokles fyzikálně-mechanických vlastností nastává převážně od teplot 400 °C [15]. Tato změna souvisí s intenzivnějším rozkladem jednotlivých komponent a také s nárůstem tlaku vodní páry uvnitř struktury betonu.

Tab. 1: Přehled změn v mikrostruktuře, které se projevují při teplotní zátěži [16]

Teplota	Změny
20–200 °C	Ztráta fyzikálně vázané a volné vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. Počátek dehydratace CSH gelů. <ul style="list-style-type: none"> - 80 °C–150 °C dehydratace ettringitu. - 150 °C–170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
300–400 °C	Praskání křemičitého plniva (350 °C). Kritická teplota vody (374 °C) – po této teplotě, nemůže být v konstrukci voda již obsažena.
400–500 °C	Rozklad portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$.
500–600 °C	Modifikační přeměna křemene z β fáze do α fáze při 573 °C.
600–800 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů a produkce β -C ₂ S.
800–1000 °C	Počátek vzniku keramických vazeb, které nahrazují hydraulické vazby doprovázené tvorbou CO ₂ . <ul style="list-style-type: none"> - Rozklad dolomitického vápence při 840 °C. - Rozklad kalcitu $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ při 930 °C–960 °C.
1000–1200 °C	Tvorba Wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). <ul style="list-style-type: none"> - Tavení SiO₂ začíná při 1050 °C.
≥ 1300 °C	Úplná degradace betonu, ztráta mechanických vlastností. Některé složky přechází do taveniny a začíná částečné slinování.

Další vývoj degradace cementových kompozitů se již může lišit a uvedená Tab. 1 pak nemusí striktně platit pro všechny typy cementových klompozitů. Hlavní rozdíl lze spatřit v tom, jak jednotlivé kameniva a pojiva reagují na zvýšenou teplotu. U teploty nad 1000 °C může docházet v betonu k částečnému slinování minerálních složek kameniva a cementového tmele. Do této doby byla pevnost mezi kamenivem a cementovým tmelem dána hydraulickými vazbami, které jsou od této teploty vystřídány vznikem keramické vazby, doprovázené vznikem nových fází například Wollastonitu. Při srovnání reakce různých cementových kompozitů však tento trend neplatí všude. V rámci publikovaných výsledků zaměřených na teplotní degradaci cementových malt [17; 18; 19] dochází k dosažení lokálního minima fyzikálně mechanických vlastností při 800-900 °C a následné slinování pokračuje do teplot 1000-1100 °C. Po této teplotě již tento typ kompozitu většinou přechází do stavu taveniny a dochází k plastické deformaci od vlastní tíhy [20]. Naproti tomu, publikace popisující teplotní degradaci betonu [21; 22] převážně označují za lokální minimum právě 1000 °C, přičemž částečné slinování nastává až po teplotě 1100 °C. V těchto případech tedy Tab. 1 platí a lze se podle ní orientovat. Jedná se tedy o synergický efekt mnoha faktorů, jejichž společným působením dochází k oslabování betonové struktury a k jejímu rozpadu. V této oblasti byl proces teplotní degradace silikátových kompozitů popsán v pracích I. Hager a kolektiv [16; 23; 24] a jedná se o problematiku, která je hojně publikována.

1.1.1 Vliv kameniva na proces degradace

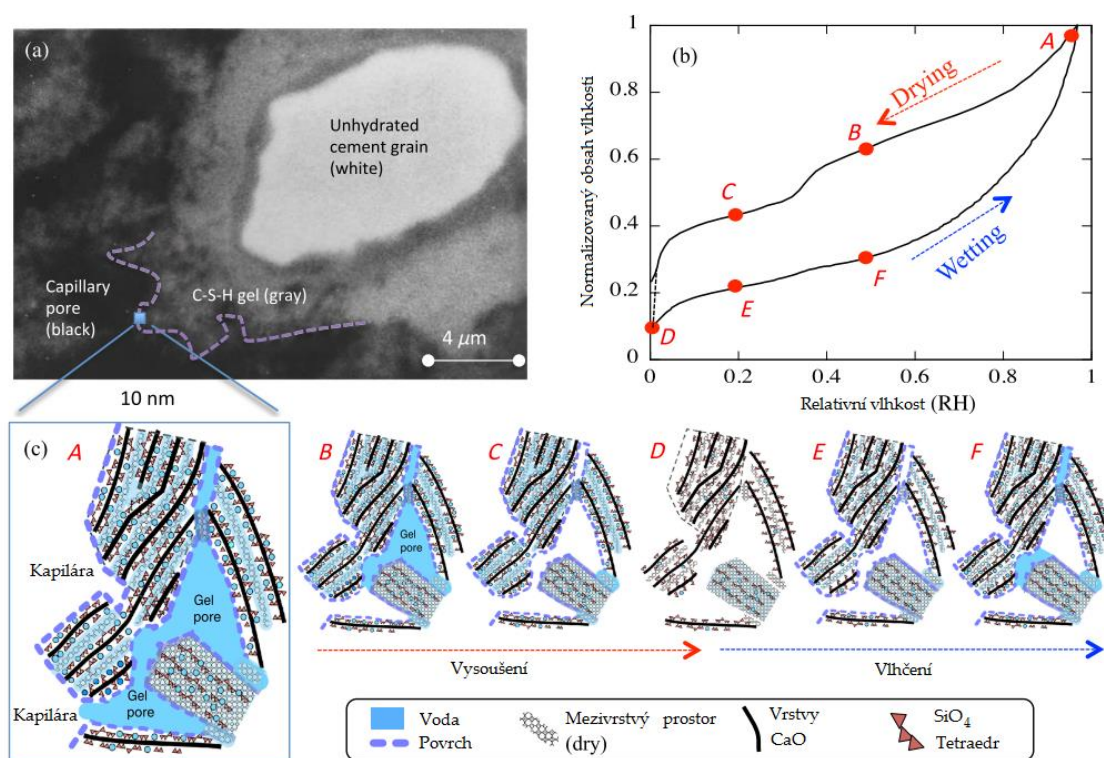
Tato složka má zásadní význam při návrhu složení betonu a velkou měrou ovlivňuje chování betonu za zvýšené teploty. Kameniva můžeme rozlišit dle základní báze, a to na křemičitá a vápenitá kameniva. Obě se dále skládají z rozličných minerálů, jedná se tedy o přírodní kompozit. Kameniva různého původu vykazují rozdílné chování při tepelném namáhání. Tomuto tématu se v posledních letech například věnovala práce J. Válka [25]. Uvnitř kameniva dochází k fyzikálně mechanickým a fyzikálně chemickým změnám. Nejsnadněji rozlišitelnou změnou při teplotním zatěžování je změna barvy. U křemičitých kameniv dochází okolo 250–300 °C ke zbarvení do červena z důvodu oxidace železitých sloučenin. Okolo 450–500 °C se zvýrazňuje okrový odstín pro křemičité kamenivo a může přejít do šedé až bílé barvy. Vápenité kamenivo se zbarvuje okolo 800–1000 °C do bíla [25].

Kamenivo se při tepelném zatěžování roztahuje. Podle typu horniny se koeficient lineární tepelné roztažnosti α pohybuje v rozmezí $(0,9-13,9) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Křemičitá složka hornin, konkrétně α -křemen, prodělává fázovou přeměnu při 573 °C na β -křemen, který má méně deformovanou strukturu. Dojde pouze k malému posunu atomů, takže při ochlazení je proces vratný [26].

Betony s použitým vápenitým kamenivem vykazují lepší odolnost vůči degradaci vysokými teplotami. Toto chování je vysvětleno dodatečnou endotermickou spotřebou tepla při přechodu uhličitánu vápenatého CaCO_3 na oxid vápenatý CaO a oxid uhličitý CO_2 [27].

1.1.2 Degradace cementového tmele

Cementový tmel je tvořen převážně CSH gely, portlanditem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a nezhydratovaným jádrem cementového zrna. Při zahřívání cementového tmele dochází ke ztrátě vlhkosti. Nejprve odchází fyzikálně volná, poté fyzikálně vázaná voda, a při vyšších teplotách začíná odcházet voda vázaná chemicky ve struktuře cementového tmele, tento proces se nazývá dehydratace. CSH gely tvoří strukturu „listů“ a právě mechanické vlastnosti se odvíjejí od chemických vazeb mezi těmito „listy“. Příklad struktury CSH gelů je znázorněn na Obr. 1. Odpařováním vody, k němuž dochází mezi „listy“ CSH gelu, je ovlivněna soudržnost mezi jednotlivými listy a tím i mechanické vlastnosti struktury CSH gelu [28].



Obr. 1: Znázornění procesu dehydratace CSH gelů [29]

Struktury CSH gelu zmenšují svůj objem v procesu dehydratace, čímž se zvyšuje pórovitost cementového tmele. Tím narůstá množství pórů i jejich rozměr, cementová matrice ztrácí soudržnost a vznikají mikropraskliny. Tento proces vysušování byl popsán v rámci ukázkové studie pana M. B. Pinsona z MIT [29], která sledovala proces vysušování cementové pasty a opětovné vlhčení jako funkci relativní vlhkosti. V rámci této studie byl zevrubně popsán proces vysušování struktury CSH gelu na mikroskopické úrovni. Takto vzniklé mikrotrhliny ve struktuře betonu snižují její pevnost a umožňují shlukování a vznik následných větších trhlin. Tímto procesem dochází k narušení transienční zóny mezi kamenivem a pojivem. Tento proces lze dokumentovat i nárůstem porozity [30]. Zde lze rozdělit póry v betonu na tři skupiny, a to mikropóry do velikosti 2 nm, mesopóry o rozměrech 2-50 nm a vzduchové póry (makropóry) o velikosti nad 50 nm [31; 32]. Vysušování cementového tmele vede k odstranění vody uvnitř vzduchových pórů, a následně i k redukci vázané v CSH gelech. Tímto způsobem roste množství mikropórů, které s pokračující degradací CSH

gelu, vede ke shlukování do větších pórů. Rovněž roste celková porozita cementového kamene, až do vzniku mikrotrhlin a makro trhlin.

1.1.3 Explosivní odprýskávání („Explosive spalling“)

V případě, že je v betonové struktuře zabráněn odchod uvolňující vodní páry může nastat explozivní odprýskávání. Jedná se o jev, který nejčastěji nastává u vysokohodnotných betonů, ale za vhodných podmínek může nastat i u běžných pevnostních tříd betonů. Betonová konstrukce má vysokou tepelnou jímavost a relativně vysokou tepelnou vodivost. V případě, že je struktura hutná a málo propustná, nastává při zvýšení teploty problém při odpařování vody. Voda má tendenci se při zahřívání přesouvat do oblastí s nižší teplotou. Pokud má beton otevřenou pórovou strukturu, dochází k ventilaci odpařené vlhkosti a možné poškození se tak eliminuje.

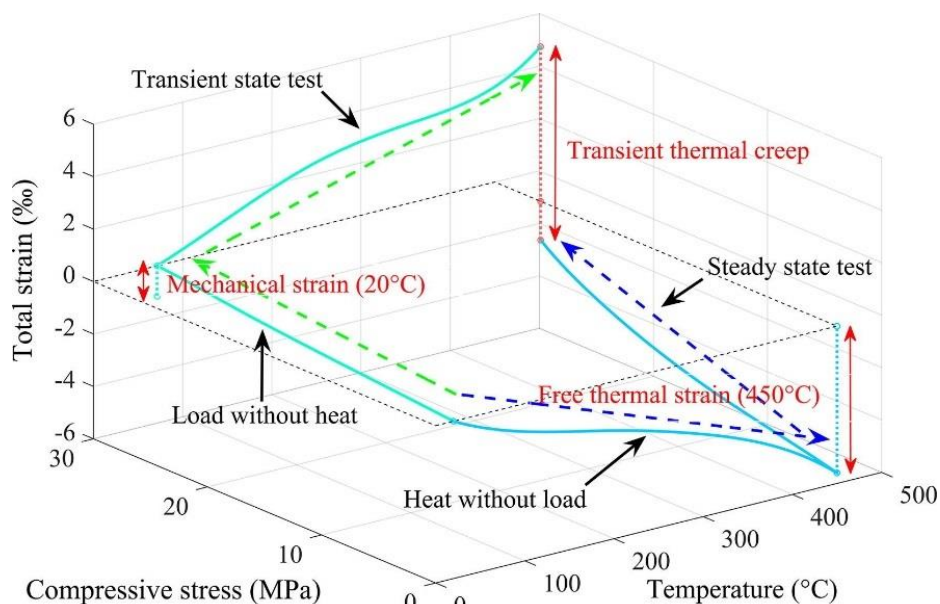
V případě, že má však beton uzavřenou pórovou strukturu, dochází k hromadění migrující a odpařené vody uvnitř pórů, uvnitř kterých roste tlak vodní páry. Beton je tak namáhán na tah, což u vysokohodnotných betonů může vyústit v tzv. explozivní odprýskávání, kdy tlak vodní páry při odpařování vody roztrhne konstrukci. Odprýskávání může nastat v podobě explozivního odprýskávání, plošného odprýskávání, štěpení a odprýsknutí kameniva, oddělení hran a rohových částí nebo odprýskávání v důsledku chemického narušení [33].

1.1.4 Dodatečné dotvarování („Transient creep“)

V rámci popisu mechanického chování betonu byl při mechanickém zatěžování kombinovaném s teplotní zátěží popsán jev ploužení (z ang. „creep“), nebo též částečné ploužení, či dotvarování (z ang. „transient creep“) [34; 35]. Tento jev se uplatňuje především u betonových konstrukcí, které jsou staticky či dynamicky namáhané a zároveň jsou vystavené zvýšeným teplotám, například od požáru. Jedná se o komplexní jev, na kterém se podílí vznik napětí od bráněné deformace způsobené vlivem teplotní roztažnosti zvlášť cementové matrice, plniva či ocelové výztuže.

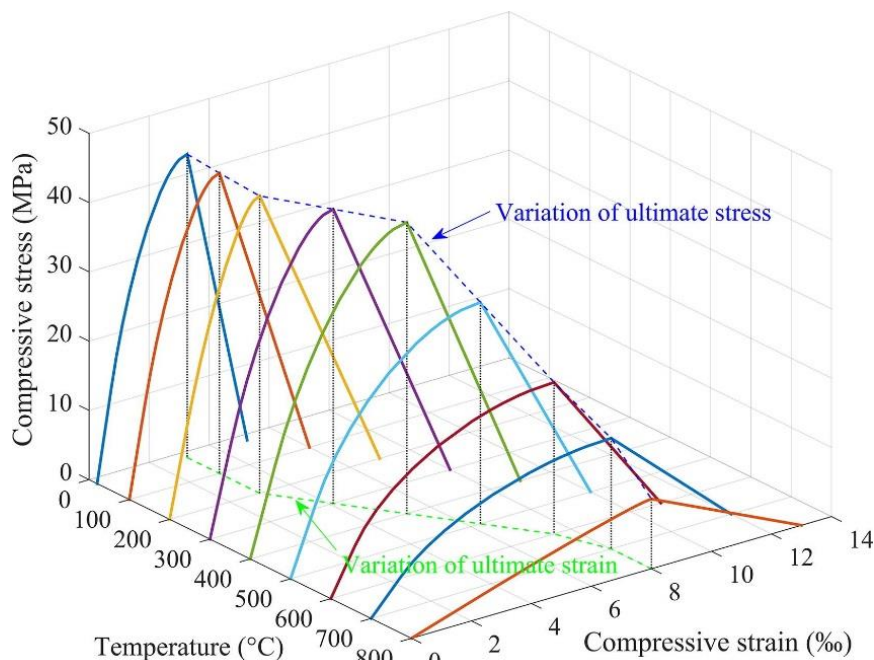
Nejnovější výsledky zahraničních autorů [34] dokumentují tento jev ve své publikaci, kde vliv teplotního a mechanického zatížení a jejich kombinace popisuje Obr. 2. Zkušební těleso v tomto případě bylo upnuto v upraveném lise, který byl vybaven pecí. Bylo tedy možné buď zatěžovat mechanicky, či teplotně, či tyto vlivy kombinovat. Prezentovaný graf se skládá z pevnosti v tlaku na ose x, ambientní teplotě, při které je těleso namáháno na ose y, a z celkové deformace znázorněné na ose z.

Zároveň jsou uvedené dva přístupy v zatěžování. Modré šipky dokumentují pořadí nejprve teplotního zatěžování, při kterém dochází k deformaci zkušební tělesa a následného zatěžování v tlaku, kdy dochází ke kompresi zkušební tělesa. Naproti tomu světle zelené šipky dokumentují pořadí nejprve zatěžování v tlaku a s tím spojenou kompresi, a poté zatěžování zvýšenou teplotou, čemuž odpovídá další komprese. V tomto lze dokumentovat efekt částečného teplotního ploužení, které v porovnání s prvním přístupem naopak ještě podpoří kompresi při zatížení.



Obr. 2: Definice částečného teplotního ploužení při různé kombinaci zatěžování mechanicky a teplotně [34]

Pokud srovnáme průběh napětí při vyšších teplotách, dostaneme průběh napětí, kdy s rostoucí teplotou roste i deformace a klesá maximální dosažené napětí. Jednotlivé pracovní křivky jsou uvedené na Obr. 3. Tento graf dokumentuje, jak se mění průběh zatěžování zkušební tělesa při běžných teplotách a při vysokých teplotách až 800 °C. S rostoucí teplotou betonu se zvyšuje poměrná deformace při působení stále stejného mechanického namáhání.



Obr. 3: Příklad průběhu závislosti napětí na deformaci různě teplotně degradovaných vzorků betonu [34]

1.1.5 Vliv způsobu teplotního zatěžování

Na chování konkrétní konstrukce při zvýšené teplotě má tedy vliv jak prostředí, tak původce požáru, kvalita provedení betonových konstrukcí i způsob zahřívání. Míra těchto změn je dána okrajovými podmínkami působení zvýšené teploty:

- dobu vystavení zvýšené teplotě,
- rychlost nárůstu zvýšené teploty, rozložení tepelného zatížení,
- tvar a umístění betonového prvku vzhledem k zdroji,
- přetížení během teplotního zatěžování – projev jevu částečného tečení [36; 34],
- rychlost a způsob následného chlazení.

Každá z těchto okrajových podmínek ovlivní změny a jejich intenzitu v posuzovaném prvku a tedy i jeho reziduální fyzikálně mechanické vlastnosti po tepelném zatěžování a vychladnutí. Teplotně zátěžové zkoušky, tzv. požární zkoušky se běžně používají, zmínit můžeme Stanovení požární odolnosti betonových konstrukcí podle ČSN EN 1992-1-2, které v závislosti na rozměru konstrukce a vrstvě krytí dovoluje posuzovat:

- železobetonové sloupy,
- betonové nenosné stěny s výztuží i bez ní,
- nosné železobetonové stěny,
- prostě podepřené nosníky z ŽB a předepjatého betonu,
- spojitě nosníky z ŽB a předepjatého betonu [37].

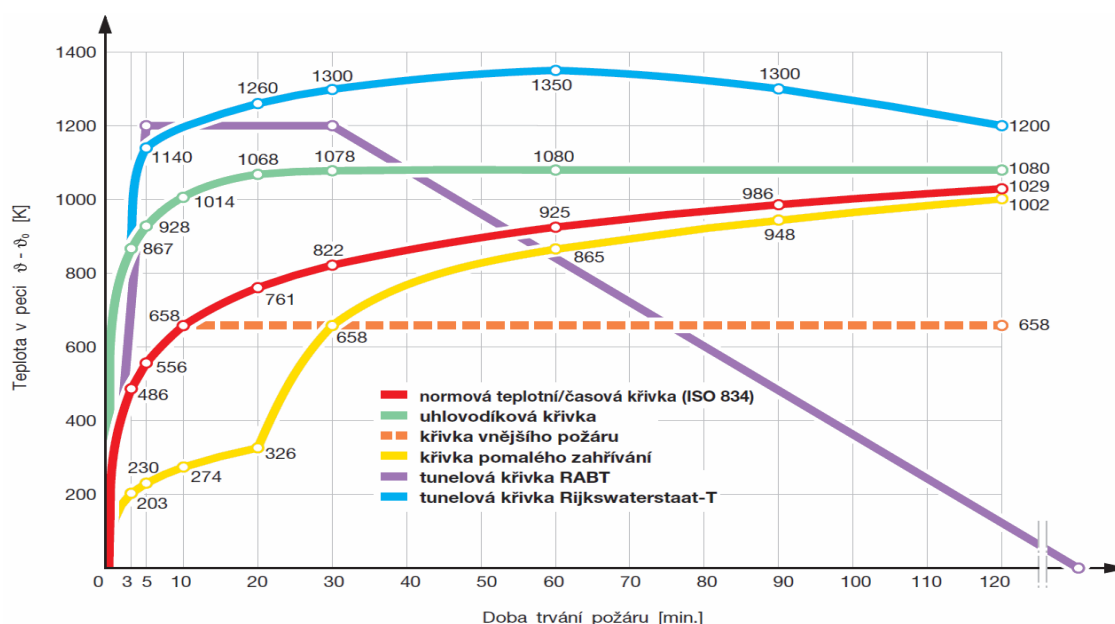
Samotný jev zvýšené teploty, (požáru) je velice neřízený proces, který je ovlivněn přísunem vzduchu, odvětráváním kouře, zdrojem požáru apod. Při požárních zkouškách je simulován v laboratorním prostředí. Tyto parametry se snažíme popsat požárními křivkami. Nejpoužívanější je normová teplotní časová křivka (dle ISO 834, viz Obr. 4), tzv. uhlovodíková křivka, křivka vnějšího požáru, křivka pomalého zahřívání, tunelová křivka RABT a tunelová křivka Rijkswaterstaat-T. Tyto křivky popisují předpokládaný nárůst teploty v čase [38].

Normová teplotní křivka (ISO křivka nebo ISO 834), která je dána rovnicí [39]:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

kde: θ_g ... je teplota plynů v požárním úseku [°C],

t ... je čas trvání požáru v [min].



Obr. 4: Požární scénáře pozvolného dlouho trvajícího požáru [40]

Tato křivka odpovídá tzv. celulózovému hoření (hoření dřeva, papíru, oděvů apod.) a je nejčastěji využívána. Vztahuje se k ní většina dostupných výsledků zkoušek a výpočtů. Účinky požárů definovaných jinými křivkami se obvykle provádějí právě na účinek požáru podle normové teplotní křivky [39].

1.2 Technická diagnostika

Jak je popsáno v předcházejících kapitolách, proces teplotní degradace betonu či cementových kompozitů je komplexní proces, který vyústí v celou řadu změn vlastností na materiálové, ale i konstrukční úrovni. Stanovit nedestruktivně míru poškození, je tedy technická výzva, pro kterou je potřeba popsat základní nástroje a postupy technické diagnostiky.

Jedná se o samostatný obor zabývající se bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky stanovení technického stavu objektu. Oproti diagnostice například v medicíně, je technická diagnostika založena na znalostech, které kromě heuristického¹ charakteru mají i kauzální charakter, nebo je dokonce založená na matematických modelech diagnostikovaných objektů. Spolehlivost, jako jeden ze základních znaků jakosti každého technického systému, je podmíněna racionálním sledováním technického stavu a včasným detekováním fyzikálních změn a procesů [12].

Diagnostika v oblasti stavebních konstrukcí je vhodným souborem metodik, zkušebních postupů pro kontrolu tvaru, kvality a rozmístění materiálu v konstrukci. Účinným nástrojem je nedestruktivní defektoskopie, jejíž hlavní předností je rychlost měření a také opakovatelnost měření.

Na rozdíl od destruktivních zkoušek, kdy se provádějí přímo měření mechanických vlastností zkušebních vzorků, jsou v oblasti nedestruktivní diagnostiky sledovány jiné parametry, které jsou korelovány s mechanickými či jinými vybranými vlastnostmi.

¹ Jedná se o nalezené řešení pomocí metod pozorování a měření a pro které jinak neznáme algoritmus, často je založené na odhadu, intuici apod. [126]

V rámci tohoto úkonu je třeba provádět kalibrace a stanovení tzv. kalibračních křivek, které pomáhají stanovovat zvolenou veličinu [41].

V oblasti technické diagnostiky můžeme zároveň rozlišovat několik základních pojmů, které jsou přehledně uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Seznam vybraných pojmů v oblasti technické diagnostiky [12]

Pojem	Význam
<i>Porucha</i>	Jev způsobující ukončení provozuschopnosti (funkčnosti) daného objektu
<i>Funkčnost</i>	Schopnost vykonávat specifickou funkci dle technických podmínek
<i>Vada</i>	Stav, při němž dochází k odchylce hodnoty měřeného parametru a jsou překročeny předepsané meze v technických podmínkách
<i>Životnost</i>	Je vlastnost objektu, která označuje, jak dlouho si objekt pravděpodobně udrží své původní nebo téměř původní vlastnosti
<i>Prognóza</i>	Je extrapolace vývoje stavu daného objektu do budoucnosti
<i>Geneze</i>	Je analýza možných a pravděpodobných příčin vzniku poruchy nebo vady
<i>Diagnóza</i>	Je vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu čili provozuschopnosti daného objektu, dílčími kroky je detekce a lokalizace vady či poruchy
<i>Deskriptor</i>	Jedná se o diagnostický ukazatel, který je odvozen z jednoho nebo více měřených parametrů
<i>Symptom</i>	Jedná se specifické vady systému, pomocí kterých lze charakterizovat, či upřesnit změnu vlastností

Z uvedeného výčtu lze zmínit především význam deskriptorů, které zvláště s nastupujícími pokročilými analytickými nástroji umožňují vytvářet sofistikované hodnotící systémy, které jsou schopné integrovat několik měřených parametrů. Tímto způsobem se tak efektivně přetváří, člověku mnohdy nesrozumitelná, změň hodnot a čísel do srozumitelné a jasně uchopitelné zástupné veličiny [42]. Příkladem může být tzv. „index kondice“ (z ang. „condition index“) [43]. V rámci této publikace výzkumný tým využil fúzi dat ze snímačů metod typu Impact-Echo, georadaru a měření elektrické rezistivity pro vytvoření hodnotícího systému mostních těles.

1.2.1 Diagnostika po požáru

U betonové konstrukce poškozené zvýšenými teplotami, může dojít k rozsáhlému poškození konstrukce a následně až ke kolapsu. Zásadními parametry při požáru je maximální dosažená teplota a výdrž na této teplotě. Tyto rozhodující parametry však většinou po požáru nejsou známy, proto je nutná diagnostika zasažené železobetonové konstrukce. Na základě provedené diagnostiky se určí rozsah poškození vyšetřované konstrukce a navrhne se způsob opravy – sanace. Rychlost a účelnost sanace poškozené konstrukce a následné obnovení provozu je důležitým hlediskem pro minimalizaci ekonomických ztrát v důsledku požáru. Opravit danou konstrukci zasaženou požárem

je samozřejmě výrazně ekonomicky výhodnější než případná demolice a opětovná výstavba [25].

Z fyzikálně-mechanických vlastností lze pevnost v tahu povrchových vrstev betonu označit za nejdůležitější část, která také nejvíce vypovídá o intenzitě požáru. Působení vysokých teplot totiž mnohem výrazněji ovlivňuje tahové pevnosti betonu oproti tlakovým. Důvodem je vznik mikrotrhlin v cementové matrici, a především vznik poruch v oblasti tranzitní zóny kameniva. Stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu se však omezuje pouze na povrch hodnocené konstrukce, proto je vhodné tento parametr doplnit stanovením pevnosti betonu v prostém tahu na odebraných jádrových vývrtech. Důležitou součástí souboru zkoušek prováděných v rámci stavebně technického průzkumu betonové konstrukce zasažené požárem jsou fyzikálně-chemické analýzy, jejichž pomocí se dá zjistit míra narušení cementové matrice betonu, resp. stavu kameniva v betonu. Na základě mineralogického rozboru cementové matrice betonu lze například blíže specifikovat teplotu, která působila na konstrukci a predikovat tak změnu pevnostních parametrů konstrukce [25].

Při monitorování stavu železobetonové konstrukce po zasažení požárem se prostřednictvím stavebně technického průzkumu sledují následující charakteristiky:

Fyzikálně – mechanické parametry betonu:

- Vizuální kontrola – nejprímější metoda posouzení, beton degradován na vyšší teplotu mění svou barvu, hledají se známky trhlin, odprýskávání a odhalené výztuže,
- pevnost betonu v tlaku – destruktivně na jádrových vývrtech, nedestruktivně pomocí Schmidtova tvrdoměru,
- pevnost betonu v prostém tahu – destruktivně na jádrových vývrtech,
- pevnost v tahu povrchových vrstev betonu – odtrhovou zkouškou na konstrukci,
- modul pružnosti – nedestruktivně ultrazvukovou impulzovou metodou na konstrukci, destruktivně na jádrových vývrtech,
- tahové zkoušky na vyzískané ocelové výztuži.

Fyzikálně – chemické analýzy:

- rentgenová difrakční analýza – kvalitativní analýza, cílem je stanovení mineralogického složení,
- diferenční termická analýza – kvantitativní analýza, cílem je kvantifikovat obsah fází tvořících matrici betonu.

1.2.2 Stavební konstrukce a materiály z pohledu legislativy

Stavební konstrukce jsou navrhovány tak, aby byly schopné odolávat celé řadě vlivů prostředí. Díky tomu jsou kladeny na používané stavební materiály a stavební konstrukce závazné požadavky.

V rámci evropského společenství (dále jen ES) byl vydán radou ES základní dokument pod názvem Směrnice Rady (Council Directive). Poslední verze požadavků jsou specifikovány k datu 29. 4. 2015 s názvem: „Požadavky na stavební výrobky s označením CE podle nařízení (EU) č. 305/2011, o stavebních výrobcích“, ve kterém jsou definovány závazné požadavky na stavby a stavební výrobky:

1. Mechanická pevnost a stabilita
2. Požární bezpečnost
3. Hygiena, zdravotní nezávadnost prostředí
4. Bezpečnost při užívání
5. Ochrana proti hluku
6. Úspora energie a tepelná izolace

V rámci požární bezpečnosti jsou pak definovány fundamentální požadavky, které jsou dále rozpracovány. Tyto požadavky jsou:

„Stavba musí být navržena a provedena takovým způsobem, aby v případě požáru:

- byla po určitou dobu zachována nosnost konstrukce,
- byl uvnitř stavby omezen vznik a šíření ohně a kouře,
- bylo omezeno šíření požáru na sousední stavby,
- obyvatelé mohli stavbu opustit, nebo aby mohli být jinými prostředky zachráněni;
- byla brána v úvahu bezpečnost záchranných jednotek.“

Z pohledu norem, co se týče požadavků na stavby můžeme zmínit:

- ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb, nevýrobní objekty
- ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb, výrobní objekty
- ČSN 73 0810 Požadavky na požární odolnost stavebních konstrukcí
- ČSN 73 0851 Zkoušení požární odolnosti (část 1 a 2)
- ČSN 73 0860 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb (část 1 a 2).

Tento dokument nese odkazy na normy, dle kterých se jednotlivé požadavky na stavby a materiály ve stavebních konstrukcích posuzují [44]. Tento aparát má za úkol minimalizovat možnost vzniku požáru ve stavebním díle a možnost jejího porušení. V případě že požár přece jen nastane, tak tyto požadavky mají zajistit, aby byly škody na díle, osobách, zvířatech, okolních stavbách a majetku minimální.

1.3 Nedestruktivní testování

Nedestruktivní metody je možno využívat ke zjišťování řady parametrů stavebních materiálů a konstrukcí, především se jedná o fyzikálně – mechanické charakteristiky – pevnosti a moduly pružnosti. Podle principů, na kterých jsou založeny se tyto metody dělí na:

- tvrdoměrné,
- místního porušení,
- dynamické,
- radiační,
- elektrické a elektromagnetické,
- chemické metody,
- akustické metody.

I když existuje celá řada nedestruktivních metod zkoušení, pro zjišťování pevnosti materiálů, především pak betonu, jsou využívány tvrdoměrné metody a metody místního porušení. Dynamické metody jsou využívány především pro zjišťování modulů pružnosti a jako podpůrný prostředek při hodnocení trvanlivosti materiálů [45].

1.3.1 Akustické trasování

Nejjednodušší z akustických metod je tzv. prozvučování, též nazývané odborněji akustické trasování. Jedná se o pulse echo metodu (angl. „sounding“), která je založená na poklepávání konstrukce sférickým kladívkem a zaznamenávání zvukové odezvy ve slyšitelné oblasti (16 Hz až 16 KHz). Tuto metodu často využívají zkušení diagnostici, kteří přímo interpretují odezvu na základě svého sluchu a zkušeností. Díky tomu se jedná o nejvíce subjektivní metodu, která však v současné praxi často pomáhá při lokalizaci místa vhodného pro zevrubnější zkoumání. Jedná se v podstatě o velmi nenáročnou a téměř beznákladovou metodu určenou pro místní průzkum. Její použití je omezeno pouze na odhalení dutin, kaveren a delaminací blízko zkoušeného povrchu konstrukce. Z pohledu přístrojové techniky a vstupu lidského faktoru, je však překonána všemi ostatními diagnostickými metodami [46].

1.3.2 Impact-Echo

Pro testování tloušťky betonových prvků se v 90. letech začala využívat akustická nedestruktivní metoda Impakt-Echo, též nazývaná rezonanční metoda s mechanickým buzením pomocí kladívka (nebo kladívková metoda). Tato metoda je založena na řízeném vytvoření budící mechanické vlny pomocí mechanického úderu a následného snímání nízkofrekvenční odezvy testovaného prvku (metoda pracuje v rozsahu 3 Hz až 20 KHz). Typické zastupitele těchto metod testování lze uvést na Obr. 5 a Obr. 6. U nás se tato metoda skrývá pod označením rezonanční metoda v rámci normy ČSN 73 1372 [47].



Obr. 5: Pokročilý přístroj pro měření pomocí metody IE v průmyslovém řešení dodávané firmou Olson Instruments Inc. [48]



Obr. 6: Kompletní sestava zařízení pro měření pomocí IE metody od firmy Impact-Echo Instruments, LLC [49]

Tato metoda našla široké uplatnění ve stavebnictví díky své jednoduchosti, nízkému nákladu na provedení a relativně širokému spektru možností použití. Zároveň je tato metoda závislá na správné interpretaci měřených dat. V praxi našla uplatnění v měření délky pilot, lokalizaci prasklin masivních monolitických konstrukcí, delaminaci mostních těles, diagnostiky stavu betonových prvků apod. Díky jednoduchému principu zkoušení existuje mnoho variací této metody v podobě například nízkofrekvenční pulse echo metody nebo modální analýzy.

1.3.3 Rychlost průchodu ultrazvuku

Metoda měření rychlosti průchodu ultrazvukového pulzu (dále UZ) je jedna s nejrozšířenějších nedestruktivních testovacích metod pro lokalizaci defektů ve stavebních konstrukcích. Tato metoda je založena na směrové excitaci zkoušeného elementu pomocí vysokofrekvenčního mechanického vlnění a měření rychlosti těchto vln protilehlým snímačem (nebo jinak umístěným). Tyto metody nejčastěji operují ve frekvenčním rozsahu 40-50 KHz, jedná se tedy o neslyšitelnou oblast.

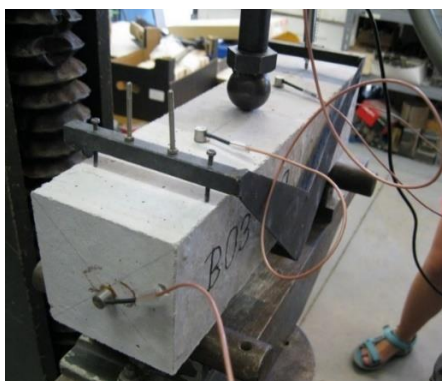
Pomocí vhodné kombinace umístění budič-snímač tak lze měřit například dynamický modul pružnosti, hloubky vzniklé trhliny, přítomnost kaveren a nehomogenit v daném materiálu. Při kombinaci s dalšími metodami lze tuto metodu též použít pro zjištění tloušťky testovaného prvku, nebo objemovou hmotnost daného prvku [46].

V laboratorních podmínkách existují též různé variace UZ metody v podobě ultrazvukové spektroskopie, která na rozdíl od rychlosti průchodu sleduje i frekvenční spektrum a změnu ve frekvenčním spektru spojitého ultrazvukového signálu po průchodu testovaným prvkem.

1.3.4 Akustická emise

Moderní akustická metoda akustické emise se nejčastěji využívá pro diagnostiku chodu strojírenských výrobků, avšak i ve stavitelství našla uplatnění například v měření lomové energie, či lokalizaci trhlin v tříbodových ohybových zkouškách či trhacích zkouškách. Jedná se o aktivní záznam místních mechanických rázů uvnitř struktury testovaného prvku, vyvolaných uvolněním napětí v důsledku působení vnějších činitelů (mechanické namáhání, vliv teploty apod.). Tím pádem je tato metoda použitelná

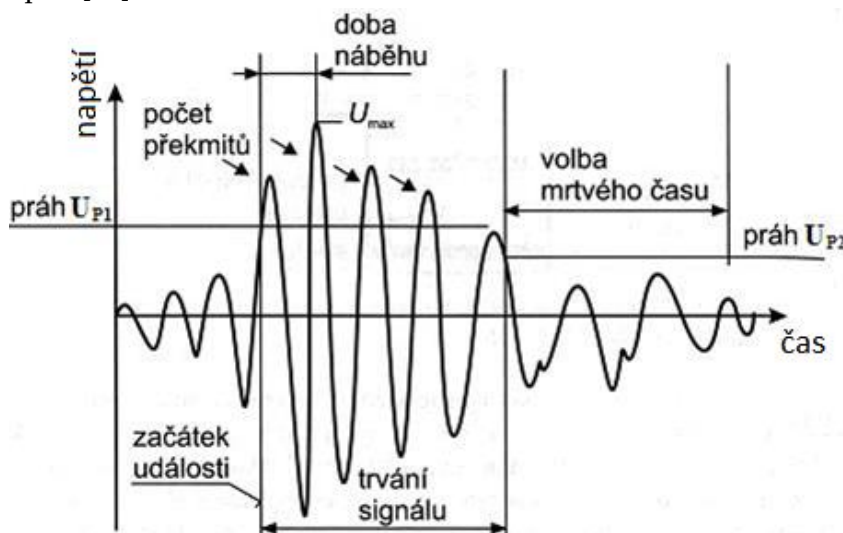
v případě, že je daný prvek vystaven nějakému způsobu namáhání. V případě mostů to může být vlastní provoz konstrukce, zatěžovací zkouška pojezdem vozidla, nebo použití aktivního budiče vlastních vibrací.



Obr. 7: Měření akustické emise při lomové zkoušce třibodovým ohybem [50]

Rozlišujeme dva druhy emitovaných signálů, a to signály spojitě nebo nespojitě (praskavé). Nespojitá akustická emise je vyvolána časově oddělenými událostmi a doba trvání těchto událostí se pohybuje řádově v nanosekundách až mikrosekundách. Spojitý signál je v podstatě soustavou po sobě rychle jdoucích nespojitých signálů, kdy nelze jednotlivé signály od sebe rozlišit.

Zdrojem akustické emise může být vznik a šíření trhlin, lom, plastická deformace, pohyb dislokací, třecí mechanismy, fázové přeměny, kavitace v kapalině, turbulentní proudění v místě úniku tekutiny a mnoho dalších změn v materiálu vlivem vnějšího či vnitřního napětí [50].



Obr. 8: Parametry nespojitého signálu akustické emise [12]

Při klasickém záznamu signálu akustické emise můžeme rozlišovat spojitou akustickou emisi a nespojitou (impulzní) akustickou emisi. Spojitý signál je tvořen událostmi, které nelze časově oddělit a může být generován celou řadou fyzikálních jevů. Vzniká tak jeden ucelený signál, který obsahuje i měření při stavu, ve kterém v měřeném médiu nedochází k žádné mechanické aktivitě. Nespojitá akustická emise vzniká při definování prahové hodnoty amplitudy, kde při překročení této hodnoty proběhne záznam signálu, a to buď po pevně definovanou dobu, nebo též po překročení prahové hodnoty při poklesu amplitudy vlivem útlumu impulsu.

Vzhledem k náročnosti této metody na rychlost záznamu a objem dat, které jsou vyprodukovány, volí se v praxi častěji záznam nespojitých signálů. V rámci toho lze popsat jednotlivé posuzované parametry pomocí Obr. 8. Z těchto parametrů lze zmínit délku trvání akustického signálu t_{AE} a energii akustického signálu. Energie signálu je plochou pod křivkou signálu a lze ji definovat vzorcem (2):

$$AE_{energie_i} = \int_{t_0}^{t_1} V_i(t)^2 dt, \quad (2)$$

kde: V_i ... okamžitá amplituda signálu v čase [V],
 t ... čas signálu [s].

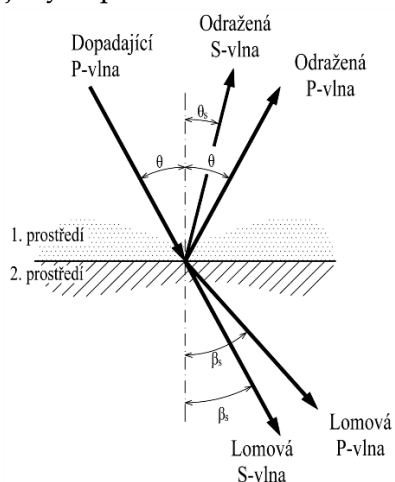
Její výhoda tkví v automatizovaném zpracování dat z velkých stavebních celků, díky čemuž jsme schopni lokalizovat zdroje akustické emise. Díky Kaiserově jevu lze také lokalizovat akustickou emisí konstrukční části, kde dochází v průběhu provozu k degradaci a vzniku nových defektů. Tato metoda je tedy využívána na průběžné monitorování stavebních konstrukcí [51].

1.4 Princip pulsně kompresních vibroakustických metod

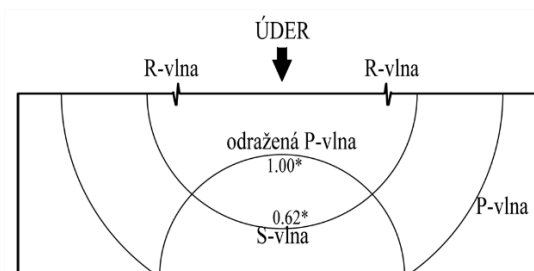
Jedná se o metody, které využívají k posuzování stavu konstrukce průchodu mechanického vlnění. Jsou založené na vnášení vibrací do testované konstrukce a sledování šíření tohoto mechanického vlnění a jejich odezvu. Patří do skupiny metod volumetrických. Způsob vnášení nebo buzení vibrací existuje celá řada a dle uspořádání měřicího postupu buzení vibrací a jejich snímání se rozlišuje celá řada zkušebních akustických metod.

1.4.1 Šíření mechanických vln

Poklepání na stavební konstrukci kladívkem je jedna z nejstarších forem nedestruktivního zkoušení. Je založené na šíření mechanické vlny skrze konstrukci. Dle toho, jaký zvuk se při poklepání ozve, zda se jedná o vysoký jasně slyšitelný nebo hluboký a tlumený zvuk, se může usuzovat v jakém stavu daná konstrukce je a jestli má či nemá nějaké vady. Metoda je to subjektivní a záleží na zkušenostech a okrajových podmínkách takového zkoušení.



Obr. 9: Odraz a lom vlny na rozhraní dvou různých materiálů [52]



*Čísla znázorňují relativní rychlost vlny

Obr. 10: Rozlišení mechanických vln při buzení signálu [53]

Při rozvibrování povrchu zkušebního tělesa (od vneseného napětí úderem) dojde k vybuzení mechanické vlny skrze zkoušenou hmotu. Pomocí Obr. 10 můžeme definovat tři druhy mechanických vln, které se šíří materiálem: P-vlna, S-vlna a R-vlna [52]. P-vlna představuje podélné kmitání spojené tahovým a tlakovým napětím, která dosahuje nejvyšší rychlosti ve srovnání s ostatními typy mechanického vlnění. S-vlna reprezentuje příčné kmitání spojené se smykovým napětím a R-vlna vzniká od kmitání šířené po povrchu materiálu, též nazývané jako povrchové Rayleiho vlnění [53; 54]. Při pohybu mechanických vln skrze materiál je tedy nejrychlejší a s nejvyšší energií P-vlna, za kterou následuje S-vlna. Při špatném nastavení měřící soupravy může dojít k záměně povrchových vln R s podélnými vlnami P nebo příčnými S. Pohyb mechanického vlnění skrze různé druhy materiálů je ovlivněn jejich hodnotou akustické impedance:

$$Z = \rho \cdot C_p \quad (3)$$

kde: $Z \dots$ akustická impedance [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],

$\rho \dots$ objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

$C_p \dots$ rychlost podélné P-vlny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Mechanické vlnění se snadno pohybuje materiálem, který má vysokou hodnotu akustické impedance (pevné materiály např. beton $Z = 6,9\text{--}10,4 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), a je úplně pohlceno nebo částečně odraženo v materiálech, jejichž hodnota akustické impedance se blíží nule (například plynné látky, vzduch $Z = 437 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Právě tento typ interakce mechanické vlny na materiálovém rozhraní popisuje Obr. 9. V okamžiku, kdy mechanické vlnění narazí na rozhraní dvou materiálů, které mají výrazně odlišné hodnoty akustické impedance (například dutina obsahující vzduch uvnitř hmoty betonu), dojde k pohlcení nebo částečnému odražení mechanické energie [3]. Tuto změnu dokážeme zaznamenat a analyzovat.

Tab. 3: Příklad hodnot akustické impedance různých materiálů [52]

Materiál	Objemová hmotnost ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Podélná rychlost zvuku C_p [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Akustická impedance Z [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
Ocel 1095	7850	5900	$46,315 \times 10^6$
Hliník	2700	6320	$17,064 \times 10^6$
Beton	2300	4500	$10,350 \times 10^6$
Plná cihla pálená	1900	3600	$6,840 \times 10^6$
Voda	998	1500	$1,497 \times 10^6$
Vzduch	1,275	343	437

Amplituda odrazu P-vlny nabývá nevyšších hodnot, pokud je úhel dopadající vlny kolmý na rozhraní dvou prostředí o rozdílné akustické impedanci Z_1 a Z_2 . V takovém případě platí tato rovnice:

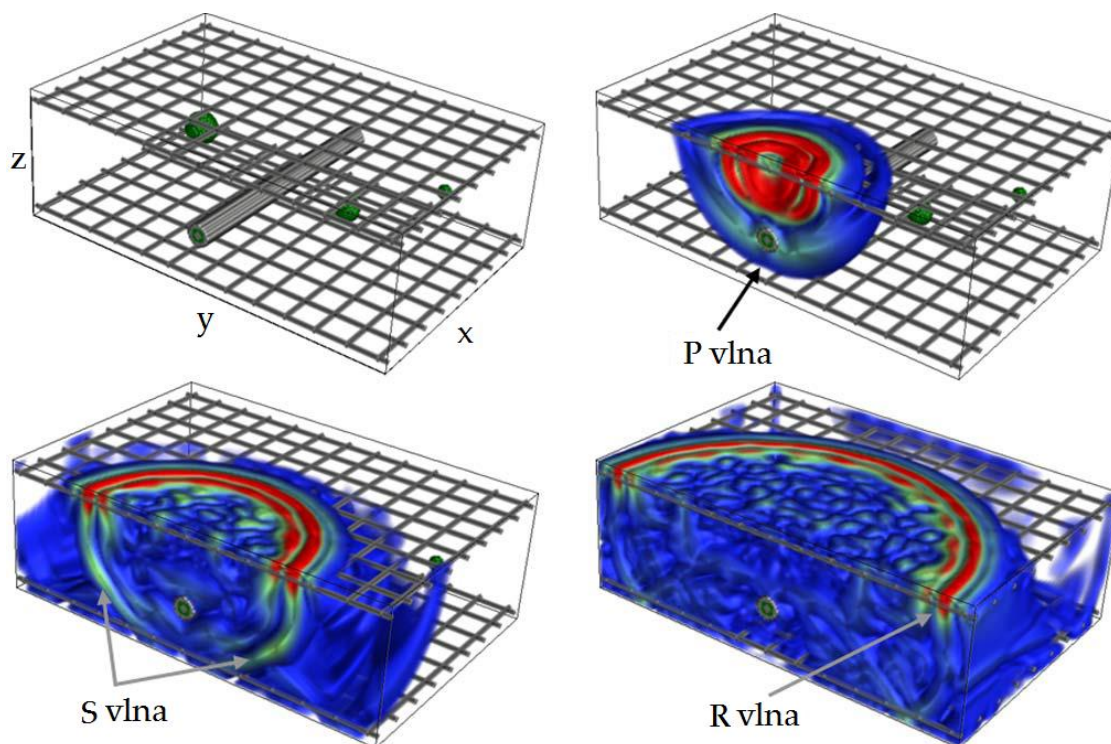
$$R_n = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

kde: R_n ... koeficient lomu pro kolmý dopad,

Z_1 ... akustická impedance prvního prostředí,

Z_2 ... akustická impedance druhého prostředí.

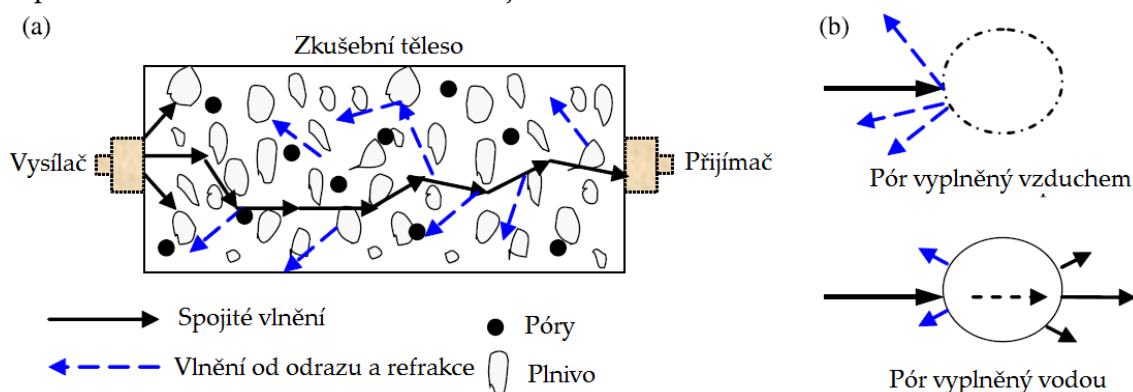
Pokud je Z_1 vyšší jak Z_2 , je koeficient lomu R záporný. Pokud je dopadající vlna nosičem tlakového napětí, odražená vlna bude naopak nosičem tahového napětí. V případě že je Z_2 je větší jak Z_1 , neproběhne žádná změna. Koeficient lomu závisí na úhlu dopadu [52]. Při šíření mechanických vln nehomogenním materiálem tedy dochází k odrazu a lámání mechanických vln na každém materiálovém rozhraní. Každá dopadající P-vlna může být lomena, nebo odražena znovu jako P-vlna nebo jako S-vlna. Podoba mechanického vlnění materiálu je tedy komplexním dějem, při kterém se kombinují všechny tři durhy vlnění. Pro každý bod materiálu zároveň platí že může být zdrojem P-vlny či S-vlny v případě lámání či refrakce mechanické vlny na rozhraní materiálů. Tento komplexní proces lze znázornit pomocí Obr. 11, který představuje numerickou simulaci železobetonového prvku se zabudovanými dutinami a výztuží. Jedná se o výstup publikace F. Schubert a kolektiv . Na tomto názorném příkladě lze rozeznat čelo mechanické vlny reprezentované P-vlnou, následované S-vlnou doprovázené povrchovou R-vlnou.



Obr. 11: Numerická simulace vlnění v ŽB tělese a znázornění jednotlivých typů vln [55]

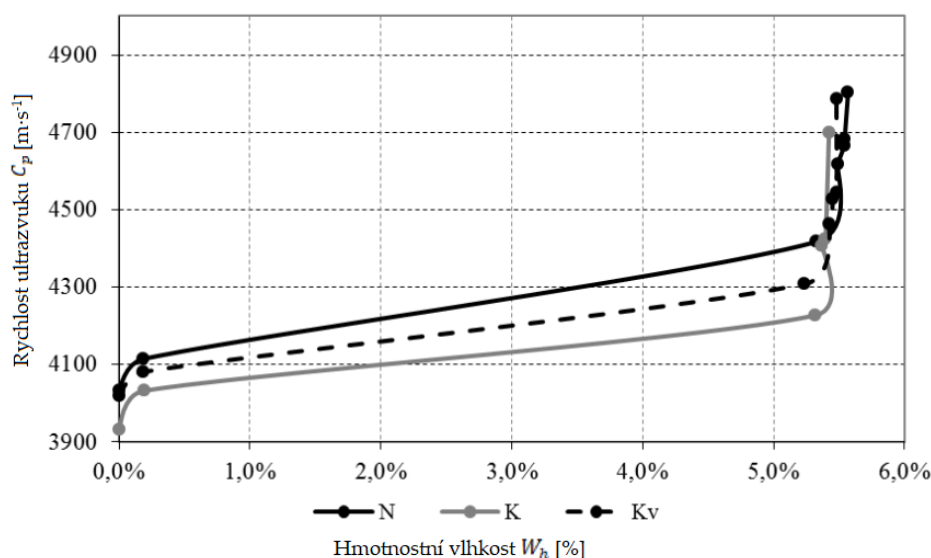
1.4.2 Vliv vlhkosti a teploty

Při měření akustických veličin stavebních materiálů je potřeba brát v potaz, za jakých podmínek toto měření probíhá. Rychlost propagace mechanické vlny v porézním materiálu je do jisté míry závislá právě na distribuci těchto pórů a jejich zaplnění kapalnou vodou. Voda má vyšší akustickou impedanci než vzduch, což znamená, že při nárazu mechanické vlny na rozhraní beton-vzduch dle rovnice (3) dojde k úplnému odrazu mechanické energie při čemž část této energie je zároveň přetvořena na energii tepelnou. Příklad tohoto mechanismu je znázorněn na Obr. 12.



Obr. 12: Měření rychlosti průchodu ultrazvuku v betonovém zkušebním tělese různého nasycení vodou [56]

Při nárazu mechanické vlny na rozhraní beton-voda dojde téměř k 90% průchodu vstupní mechanické energie. Toto může nastat, pokud je pór zcela vyplněný kapalnou vodou a je tedy téměř přímo průchozí pro kinetickou energii mechanické vlny. Důležité je podotknout, že tento stav je ideální a předpokládá, že pór je zcela vyplněn vodou, což vzhledem k povrchovému napětí vody za normální podmínky nenastane, což znamená, že pór je vyplněn pouze z části. Tento rozdíl lze dokumentovat na výsledcích studie [57], která sledovala vliv obsahu hmotnostní vlhkosti na rychlost průchodu ultrazvuku při různě nastaveném zrání zkušebních těles. Na Obr. 13 je znázorněna závislost rychlosti ultrazvuku na různém obsahu hmotnostní vlhkosti. Zkušební tělesa dosahují v zcela vysušeném stavu rychlost ultrazvuku okolo $3900\text{--}4050\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a při plném nasycení dosahují rychlost šíření ultrazvuku okolo $4700\text{--}4800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 13: Vliv obsahu hmotnostní vlhkosti na rychlost podélné vlny [57]

1.4.3 Výpočetní vztahy

Zkoušení betonových vzorků pomocí rezonanční kladívkové metody detailně popisuje norma ČSN EN 73 1372 [47]. Popisuje zkušební postup při měření rezonanční frekvence v podélných vln f_L , první a druhou rezonanční frekvenci $f_{t,1}$ a $f_{t,2}$ ohybových vln a první dominantní frekvenci torzních vln f_t . Tato část se detailně věnuje podmínkám, které je nutno zohlednit při měření, jako je uložení zkušebních těles na pružné podložce, umístění snímače a místo úderu kladívka. Způsob uložení zkušební tělesa je znázorněn na Obr. 14. Dále zohledňuje rozměrnost prostředí k_e^2 , kterou lze vypočíst dle vztahu:

$$k_e = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \cdot \left(\frac{b}{h}\right) - 2,52 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2 + 0,21 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^6} \quad (5)$$

kde: $b \dots$ kratší strana průřezu hranolu [m],

$h \dots$ délka strany průřezu hranolu [m].

Pokud tento vzorec použijeme na klasická zkušební tělesa hranolů o rozměrech $0,1 \times 0,1 \times 0,4$ m, dostáváme hodnotu součinitele rozměrnosti 1,183. Za optimální rozměr zkušební tělesa pro rezonanční metodu lze též považovat těleso prizmatického tvaru.³

Pro tyto měřené veličiny dále norma uvádí přepočtení vztahy pro získání dynamického modulu pružnosti v betonu vyhodnoceného buď z podélné rezonanční frekvence E_{crL} , či rezonanční frekvence vln krouživých E_{crf} . V rámci tohoto vyhodnocení je upřednostněn výpočet dynamického modulu pružnosti E_{crL} před E_{crf} . Dále uvádí přepočtení vztah spočtení dynamického modulu pružnosti ve smyku G_{cr} , který je možné získat z měření rezonanční frekvence krouživého kmitání. Dále dynamický Poissonův koeficient betonu ν_{cr} a to buď pomocí přímo měřených frekvencí f_L a f_t nebo pomocí spočtených dynamických modulů pružnosti E_{crL} a G_{cr} . Výpočtové vzorce těchto veličin jsou:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (6)$$

$$G_{cr} = 4 \cdot k_e \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (7)$$

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_e} \cdot \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (8)$$

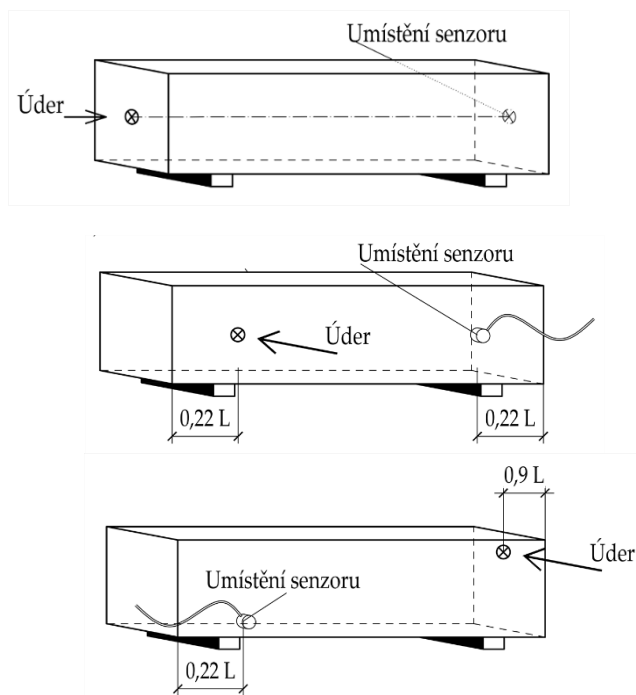
$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_e} \cdot \frac{E_{cr}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (9)$$

Kde: $L \dots$ délka zkušební tělesa [m],

$\rho \dots$ objemová hmotnost testovaného tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

² Pro účel přehlednosti je koeficient rozměrnosti v této práci doplněn indexem e aby nedošlo k záměně s tuhostí systému k

³ Prizmatický tvar je dán poměrem podélné a příčného rozměru $\geq 2:1$



Obr. 14: Poloha sond při testování: měření rezonanční frekvence podélného kmitání (nahore); měření první a druhé rezonanční frekvence ohybového kmitání (uprostřed); měření rezonanční frekvence kroutivého kmitání (dole)

Kladívková rezonanční metoda je hlavně navržena pro testování zkušebních těles a získání jejich nedestruktivních dynamických modulů pružnosti v tlaku a ve smyku. Rozsah této metody lze dobře použít pro testování zkušebních těles jasně definovaných tvarů zkušebních válců či trámů. Rozdíl mezi touto metodou a Impact-Echo dle Amerického standardu ASTM C1383 [58] spočívá ve využití na celých konstrukcích. Tato norma popisuje způsob provádění měření, vyhodnocování dílčích měření a pomáhá s následnou interpretací. Kromě frekvenční analýzy popisuje i časovou analýzu signálu. Porovnávají se zde dva signály, kdy první signál náleží budícímu úderu kladívka a druhý signál je zaznamenán snímačem. Tento signál koresponduje s odezvou zkušebního tělesa. Z rozdílného začátku signálů lze stanovit rychlost šíření mechanické vlny v materiálu. Z historicky provedených měření byl empiricky stanoven přepočtní vztah mezi frekvencí podélného prizmatického tělesa, jeho délkou a rychlostí podélné mechanické vlny [59]. Tento přepočtní vztah lze vyjádřit následovně:

$$f = \frac{C_p \cdot k_c}{L \cdot 2} \quad (10)$$

kde: f ... vlastní rezonanční frekvence [Hz],
 C_p ... rychlost podélné vlny v prvku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 k_c ... koeficient zohledňující vliv materiálu (0,93-0,96 pro prostý beton) [-],
 L ... délka zkušebního tělesa v podélném směru [m].

V literatuře je koeficient k_c vyjádřen číselnou bezrozměrnou veličinou, která nabývá hodnot od 0,93-0,98 [59; 60; 61] v závislosti na zdroji. Jeho účelem je zohlednění heterogenity zkoumaného materiálu. Pokud by byl tento vztah použit pro měření

na výrazně homogenním materiálu, například na oceli, nabyl by tento koeficient k_c hodnot blízkým 1.

Další součástí této metody je kontrola poměru rezonančních frekvencí. Tento přepočet slouží ke kontrole správnosti naměřených frekvencí a je dán poměrem (11):

$$f_{t,1} : f_f : f_L = 1 : 1,34 : 1,538 \quad (11)$$

Jedná se o poměry frekvencí měřených na ideální krychli z homogenního a izotropního materiálu. Při vyhodnocování spektrogramů, lze tyto poměry použít jako vodítko při stanovení, zda byla vybrána správná dominantní frekvence, a nikoliv její harmonické složky.

2 Cíle práce

Při zatěžování betonových a železobetonových konstrukcí vysokými teplotami dochází k fyzikálně-mechanickým a fyzikálně-chemickým změnám, které se podílejí na postupném snižování únosnosti konstrukce. Ze statického pohledu klesá pevnost v tlaku i pevnost v tahu. Únosnost se snižuje až do stavu meze přetvoření a meze porušení. Únosnost konstrukce se může snižovat až do překročení meze použitelnosti nebo dokonce meze únosnosti. Potom vlivem aktuálního zatížení může dojít k destrukci prvku.

Degradace vysokou teplotou, například od požáru, exploze nebo chemické reakce, nevzniká v diskrétním místě, ale má spojitou formu gradientu. Na konstrukci vzniká teplotně zatížené místo, kde směrem od zdroje zvýšené teploty klesá působící teplota, v důsledku čehož se snižuje i míra degradace konstrukce, v závislosti na délce expozice.

Klasickým způsobem testování únosnosti stavební konstrukce jsou destruktivní zkoušky, chemická analýza, diferenčně termická analýza nebo rentgenová difrakční analýza. Pro tyto zkoušky je potřeba odebrat vzorek, nejčastěji jádrovým vývrtem. Jedná se o invazivní zásah, který je nákladný na čas a práci. Na základě výsledků ze zkušebních těles jsme schopni posoudit konstrukci pouze v daných bodech.

Dle současného stavu poznání je zřejmé, že akustické nedestruktivní metody jsou obecně považovány za vhodný nástroj pro stanovení míry degradace či lokalizaci lokálního strukturního poškození a mohou tedy pokrýt nedostatky výše uvedených metod.

Na základě současného poznání tedy lze navrhnout vhodné cíle, které respektují dílčí závěry vědeckých publikací:

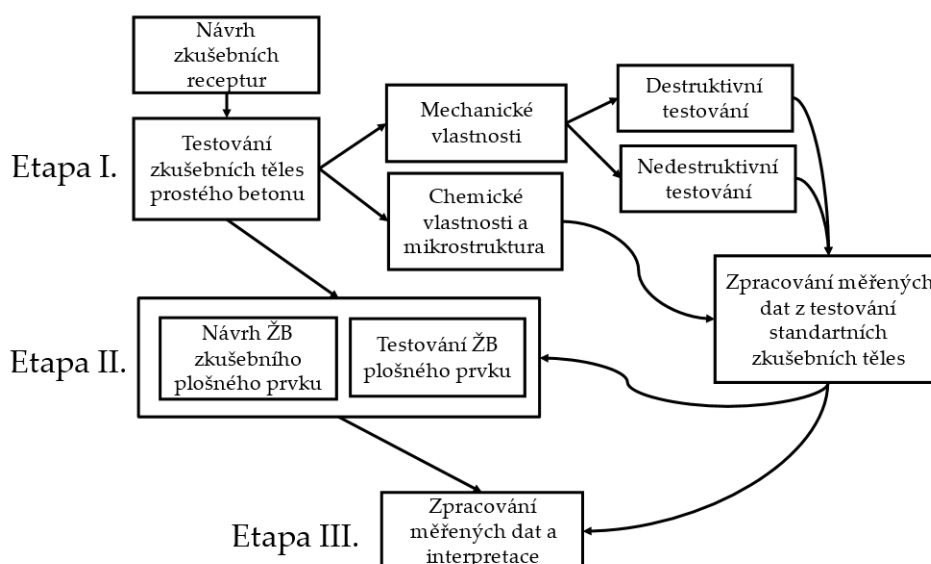
- 1) **Ověření použitelnosti akustických NDT metod** pro stanovení míry poškození betonu různého složení vysokými teplotami.
- 2) **Srovnání akustických metod s konvenčními metodami testování** a posouzení **jejich použitelnosti** pro posuzování teplotně degradovaného betonu.
- 3) Posouzení **vlivu složení betonu** na průběh teplotní degradace.
- 4) **Optimalizace akustické nedestruktivní metody Impact-Echo** jako doplňujícího diagnostického nástroje pro posuzování betonových konstrukcí vystavených vysokým teplotám.
- 5) **Ověření použitelnosti akustických metod při testování železobetonového prvku.**

3 Zvolené metodiky testování

3.1 Plán zkoušení a etapy výzkumu

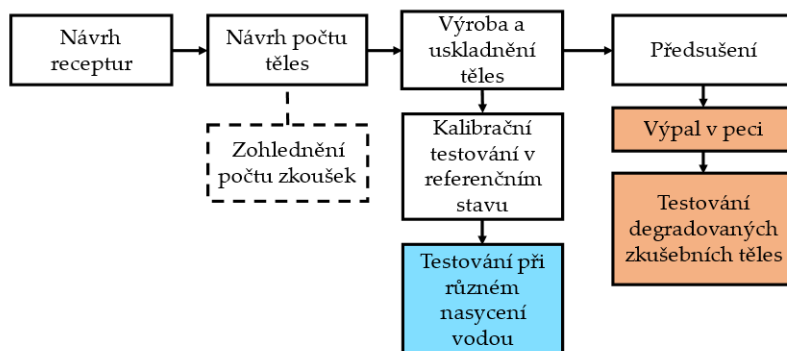
Návrh výzkumu se skládá ze tří etap, jak je uvedeno na Obr. 15. V první etapě bylo provedeno navržení pěti zkušebních receptur různých pevnostních tříd. Na těchto směsích byly provedeny vybrané zkoušky z oblasti nedestruktivního a destruktivního testování. Vybrané směsi byly posouzeny difrakčně rentgenovou analýzou pro posouzení změn v oblasti mineralogického složení a fázových změn. Tímto byly ověřeny poznatky z literatury o možných fázových změnách v betonu za vysokých teplot [62; 38]. Tato první etapa byla zároveň charakteristická homogenní teplotní zátěží zkušebních těles. Tímto byl získán materiál degradovaný v celém objemu konkrétní teplotou a tyto výsledky tak umožnily provést kalibraci nedestruktivně měřených parametrů s výsledky destruktivních zkoušek.

Takto získaná data jsou pak využita ve druhé etapě, kdy byl vyroben plošný železobetonový prvek, který byl testován a posouzen akustickými nedestruktivními metodami.



Obr. 15: Schéma testování materiálů v rámci disertační práce

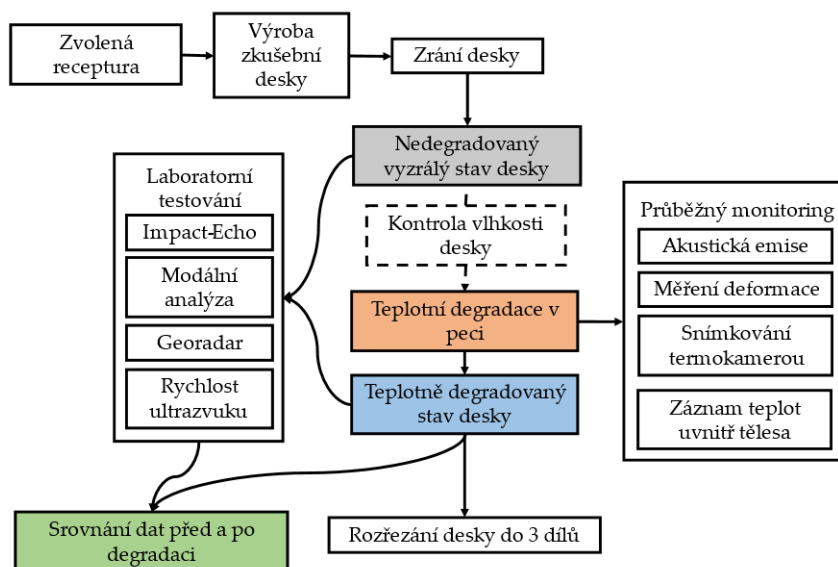
Druhá zkušební etapa pak ověřila použitelnost jednotlivých nedestruktivních metod na železobetonovém plošném prvku. Ve většině publikací v oblasti posouzení teplotně degradovaného betonu [2; 5; 1] jsou testy prováděny na zkušebních tělesech krychlí či trámů z prostého betonu. V oblasti stavebních konstrukcí se však prostý beton používá pouze v omezené míře, a to často pouze v nenosných prvcích. Dále jsou tyto prvky často degradované v celém svém objemu umístěním do pece. V takovém případě se zkušební těleso skládá pouze z degradovaného materiálu.



Obr. 16: Schéma procesu při návrhu receptur a jejich řízená degradace a testování

Součástí etapy č. 2 bylo vytvoření teplotního gradientu uvnitř plošně vyztuženého železobetonového zkušebního tělesa, kdy byla vysoké teplotě vystavena pouze omezená část tělesa. Tím byl v rámci jednoho zkušebního tělesa přítomen degradovaný materiál, který byl již diskrétně analyzován v etapě č. 1. Tímto způsobem byla možná aplikace dříve provedené kalibrace a její zpřesnění v rámci složitějšího prvku. V rámci této etapy byla navázána spolupráce s laboratorní přenosu tepla pod fakultou strojní VUT [63]. Tato laboratoř je vybavena vertikální pecí s jeřábem a možností softwarově regulovat výkon pece a záznamu teplot v měřených prvcích. V rámci tohoto měření bylo provedeno měření i v průběhu výpalu zkušební desky, jak je vidět na schématu měření Obr. 17.

Testování plošného železobetonového prvku proběhlo ve třech fázích, testování před výpalem, monitorování v průběhu výpalu a testování po výpalu. Tímto způsobem byly zaznamenány všechny fáze řízené teplotní degradace zkušební desky.

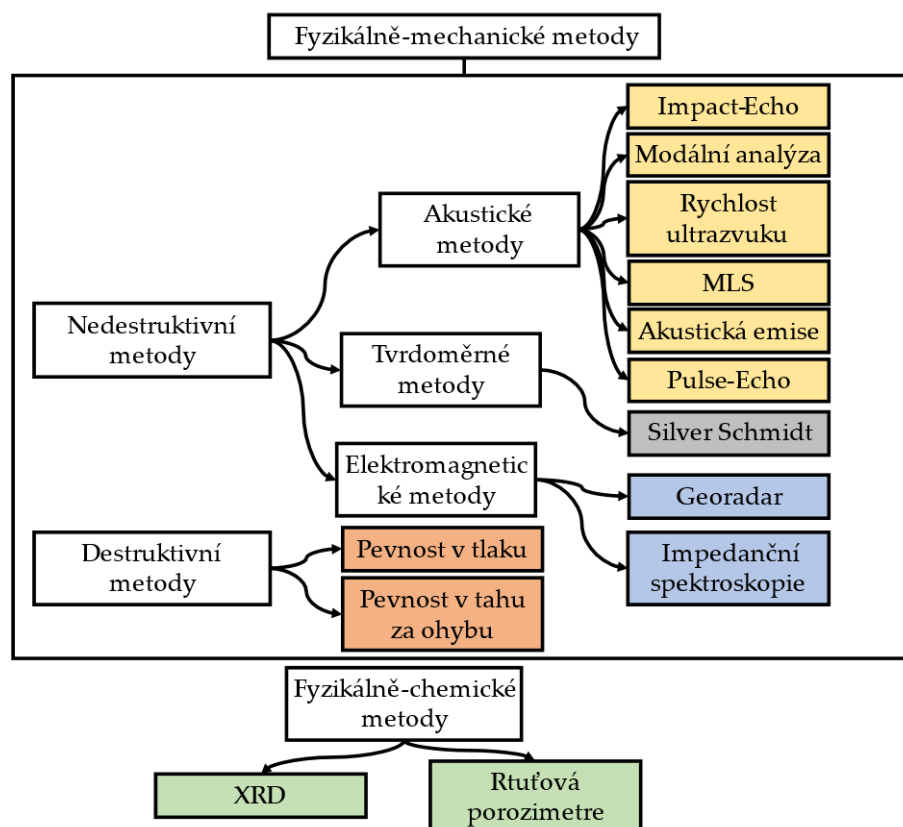


Obr. 17: Schéma testování ŽB plošného elementu

Poslední třetí etapa byla zaměřena na zpracování naměřených dat a jejich interpretaci. Součástí této etapy bylo též vyjádření vzájemné korelace jednotlivých zkušebních metod. Tímto způsobem byla posouzena schopnost jednotlivých metod stanovit míru tepelné degradace, a to jak v případě zkušebních těles prostého betonu, tak v případě plošného železobetonového prvku.

3.2 Použité metody pro testování

Na Obr. 18 jsou uvedeny všechny zkušební metody, které byly v průběhu měření použity a jejichž výsledky byly mezi sebou posuzovány. Majoritní částí použitých metod tvoří metody akustické, na které je zaměřena i tato práce. Pro jejich srovnání s dalšími metodami byla vybrána tvrdoměrná metoda, měření pomocí georadaru a impedanční spektroskopie.



Obr. 18: Schéma všech použitých metod

Pro posouzení změn v materiálu po fyzikálně-chemické stránce byla zvolena rentgenová difrakční analýza a rtuťová porozimetre. Jak bylo prokázáno v zahraničních pramenech, a i z výsledků této práce vyplývá, že s rostoucí teplotní degradací dochází k nárůstu pórovitosti testovaného materiálu, zvyšování vodní absorpce, poklesu objemové hmotnosti a také k fázovým změnám jednotlivých přítomných minerálů. Tyto metody mají tedy účel doplnit provedené zkoušky a pomoci porozumět, čím jsou způsobené jednotlivé změny.

3.2.1 Rychlost průchodu ultrazvuku

Jedná se o dynamickou metodu zkoušení, která je založena na vysílání opakovaných ultrazvukových (dále UZ) signálů skrze zkoušený materiál a následné snímání prošlých signálů. Výstupem z tohoto měření je rychlost šíření UZ signálu v dané hmotě. Ultrazvuk můžeme chápat jako zvukové vlny o frekvenci nad mezí slyšitelnosti (čili nad cca 20 kHz).



Obr. 19: Měřicí aparatura „Ultrasonic Pulse Analyser“ 58-E4900 dodaný firmou PULSONIC

Ultrazvuková impulzová metoda patří do třídy dynamických nedestruktivních metod. S její pomocí se dá zjišťovat dynamický modul pružnosti. Nedestruktivně zjišťované moduly pružnosti bývají o 20-30 % vyšší než statické. Nevýhodou je rozdílnost dynamického a statického modulu pružnosti, kterou však nelze jednoznačně zobecnit pro různé stavební materiály. Předností je však rychlost a jednoduchost stanovení [64].

$$E_{cu} = \rho \cdot V_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (12)$$

kde: E_{cu} ... dynamický modul pružnosti [MPa],

ρ ... objemová hmotnost materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

V_L ... rychlost šíření podélného ultrazvukového impulsu [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$],

k ... součinitel rozměrnosti prostředí, pro zkušební trámce [65].

Při přenášení ultrazvukového signálu mezi budičem a zkoušeným trámcem je potřeba zaručit co nejtěsnější kontakt budiče a snímače. Vzhledem k nerovnosti povrchu by i sebemenší vzduchová mezera ovlivnila UZ signál (díky velkému rozdílu akustické impedance vzduchu a betonu), z tohoto důvodu se využívá vazebního prostředku. V běžné strojařské praxi se k tomu využívá vazebních gelů na vodní bázi. V případě zkoušení kovů je toto optimální řešení. Pokud však zkoušíme porézní materiál, nastává problém, neboť gel je vysušován a absorbován do zkoušeného materiálu a tím ovlivňuje výsledky měření. V rámci této práce byla použita plastelína jako vazební prostředek.

3.2.2 Tvrdoměrné testování

Tvrdoměrné metody se využívají především pro zjišťování pevnosti v tlaku, eventuálně také k zjištění tvrdosti vyšetřovaných materiálů. Ve stavební praxi je nejvíce využíváno pro zkoušení pevnosti v tlaku betonu v konstrukcích [45].

Tvrdoměrné metody dělíme na tyto základní:

- odrazové – jsou založeny na odrazu pružného tělesa od povrchu materiálu,
- vtiskové – jsou založeny na měření vtisku vytvořeného ve vyšetřovaném materiálu zatlačením či zaražením tělesa definovaného tvaru,

- špičáková – podstata metody spočívá ve zjištění hloubky průniku špičáku do zkoušeného materiálu za definovaných podmínek,
- brusné – podstata metody spočívá v měření energie spotřebované na vybroušení stopy o určité délce a šířce ve zkoušeném materiálu,
- vrtací – podstata metody spočívá ve zjišťování hloubky průniku vrtacího nástroje do materiálu za definovaných podmínek – počet otáček, přítlačná síla, měření příkonu vrtačky apod.



Obr. 20: Silver Schmidt tvrdoměr

V rámci této práce bylo použito tvrdoměrné kladívko Silver Schmidt typu N. Toto zkušební zařízení pracuje na principu měření odrazu rázového členu od povrchu očištěného betonu. Úderník (beran) se od povrchu odrazí energií rovné tvrdosti betonu. Hodnota odrazu se odečte a v převodních tabulkách či diagramu se najde odpovídající pevnost v tlaku. Typ N se dá použít pro rozsah měřených pevností od 10 do 70 MPa [66].

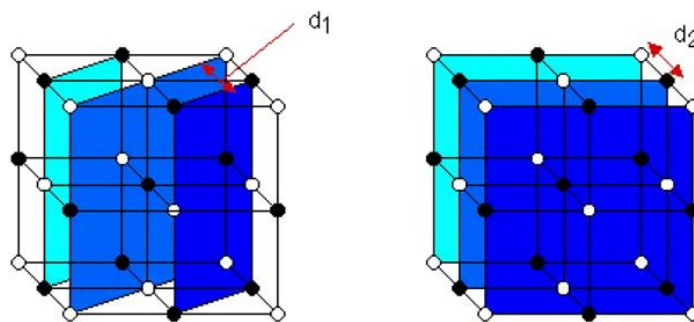
3.2.3 Destruktivní zkoušky

Nedestruktivní výsledky zkoušek nám dávají přibližné hodnoty, kterými se snažíme popsat skutečný stav konstrukce, materiálu. Pro ověření skutečného charakteru materiálu je potřeba provést destruktivní zkoušky. V rámci práce byly ještě využity:

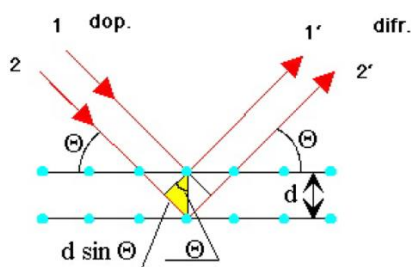
- ČSN EN 12 390-7: Zkoušení ztvrdlého betonu – část 7: Objemová hmotnost zatvrdlého betonu,
- ČSN EN 12 390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.
- ČSN EN 12 390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.
- ČSN EN 772-7 Zkouška nasákavosti.

3.2.4 Rentgenová difrakční analýza

Tato metoda slouží ke stanovení mineralogického složení zkoumaných materiálů. V praxi tedy pomocí této metody doplňujeme poznatky získané o chemickém složení hodnocených materiálů. V oblasti analýz silikátových materiálů sehrává rentgenová difrakční analýza (RTG analýza) velmi významnou roli. Může být použita jak pro kvalitativní posouzení analyzovaného materiálu (tzn. stanovení přítomnosti minerálů), tak též pro stanovení kvantitativní (tzn. stanovení množství jednotlivých fází ve vzorku).



Obr. 21: Soustavy krystalických rovin s různou mezirovinnou vzdáleností



Obr. 22: Schéma skládání rentgenových paprsků na krystalické mřížce

RTG paprsky dopadají na krystalické roviny a odráží se pod úhlem θ . Dráhový rozdíl paprsků 1' a 2' je roven $2d \sin \theta$.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad n=1,2,3 \quad (13)$$

Uvedený vztah (13) je znám jako tzv. Braggova rovnice. Známe-li vlnovou délku λ a změříme-li úhel θ (ilustrováno na Obr. 22), můžeme určit vzdálenosti d krystalových rovin, identifikovaných známými Millerovými indexy, které udávají polohu rovin v prostorové mřížce (ilustrováno na Obr. 21). Proto se označením mezirovinné vzdálenosti d těchto rovin podle potřeby doplňuje Millerovými indexy d_{hkl} (např. d_{001} – bazální rovina). Na tomto principu je založena vědní disciplína – rentgenová difrakční analýza. Jestliže známe hodnoty souboru mezirovinných vzdáleností zkoumané látky, můžeme určit, jaké minerály jsou ve zkoumané látce obsaženy. Tuto metodu lze tedy použít ke stanovení mineralogického (fázového) složení všech látek, které mají krystalický charakter.

3.2.5 Tlaková rtuťová porozimetrie

Při teplotní degradaci cementových kompozitů dochází k postupnému vysušování a CSH gelů, čímž je způsoben nárůst mikrotrhlin a vznik nových pórů [32] [67] [68]. Tento proces je zároveň spojený se snížením pevnosti takto degradovaného kompozitu. Pro posouzení této změny mikrostruktury je tedy vhodné analyzovat změnu porézní struktury. Pro tento účel lze zmínit dva různé přístupy pro stanovení porozity, a to metody založené na adsorpci a desorpci plynů (nejčastěji v podobě nízkoteplotní adsorpci dusíku) [69] a metody založené na intruzi (vtlačování) rtuti do pórů. V oblasti analýz silikátových materiálů se téměř výhradně využívá rtuťová porozimetrie, kterou lze v porovnání s metodou založenou na adsorpci plynů podstatně snadněji interpretovat.

Rtuť je za běžných laboratorních podmínek nesmáčivý kapalný kov, který lze díky této vlastnosti vtlačet do porézní struktury vzorku. Jeho nesmáčivost zamezí přirozenému kapilárnímu vztlínání, a pro vnikání rtuti do vzorku je tedy potřeba vyvodit

vyšší hydrostatický tlak rtuti. Čím vyšší hydrostatický tlak je v rtuti vyvozen, tím proniká do menších pórů vzorku. V závislosti na vyvozeném tlaku, povrchovém napětí rtuti ($\gamma=0,48 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$) a smáčecím úhlu rtuti ($\theta=141,3^\circ$) lze vyjádřit vztah mezi poloměrem kapiláry, tedy mikropóru a minimálním tlakem, který způsobuje vnikání rtuti do daného mikropóru. Tento vztah lze vyjádřit:

$$r_p = \frac{2 \cdot 0,48 \cdot \cos 141,3}{p} = \frac{0,75}{p} \quad (14)$$

Kde: $r_p \dots$ poloměr pórů [m],
 $p \dots$ hydrostatický tlak rtuti [Pa].

Tento vztah odvodil G.W. Washburn [70] a je založen na několika zjednodušení reálné situace:

- póry mají kruhový průřez, resp. jsou válcového tvaru,
- během měření se v důsledku zvyšujícího se tlaku vzorek nedeformuje,
- hodnoty povrchového napětí γ a úhel smáčení γ se v průběhu zkoušky nemění,
- systém je v rovnováze.

Při vtlačení rtuti do vzorku pak platí nepřímá úměra mezi změnou vyvozeného tlaku rtuti a poloměru pórů, kdy změna při nízkých tlacích odpovídá velkým rozdílům poloměru pórů. Naopak při vysokých tlacích i relativně velká změna v tlaku znamená nepatrné změny v poloměru pórů. To zároveň znamená, že póry jsou zaplňovány od největších po nejmenší. Díky technickým limitacím, co se týče přesnosti, jsou rozměry detekovatelných pórů omezeny rozsahem 1 mm – 3 nm (tlak dosahující až 414 MPa) [71].

3.2.6 Georadar

Jedná se o elektromagnetickou zobrazovací techniku, která se běžně používá pro lokalizaci dutin, potrubí, výztuže a různých druhů defektů v hmotě. Georadar, v angličtině nazývaný „*Ground penetrating radar*“ (dále GPR), byl prvně patentován v roce 1910 [72], od té doby se několikrát vrátil v rámci různých světových publikací a patentů, ale první masivnější, a hlavně jednodušší použití bylo umožněno až s vývojem pokročilé mikroprocesorové techniky. První sofistikovanější použití bylo pro detekci vojenských podzemních úkrytů v 70. letech minulého století. V současnosti se georadary používají ve stavební diagnostice, při průzkumných pracích a slouží jako kontrolní nástroj například pro posouzení přesnosti uložení kluzných trnů v cementobetonových krytech [73].

Princip této technologie je založen na analýze difrakce a odrazu elektromagnetického (dále EM) vlnění o frekvencích od 0,1 MHz do 2,6 GHz. V takovém případě se využívá generátoru vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění směrem do testovaného materiálu. Následný odraz tohoto vlnění od rozhraní materiálů je zaznamenán anténou, kdy rychlost šíření EM vlnění v materiálu je závislá na dielektrických vlastnostech jednotlivých vrstev, ze kterých je testovaný prvek složen. Na rozhraní těchto materiálů tak dochází k refrakci, odrazu či absorpci EM vlnění. V této oblasti lze doložit negativní vliv obsahu vlhkosti na získaný odraz EM vlnění [74].



Obr. 23: Záznamová karta DAD



Obr. 24: Anténa s vzorkovací frekvencí 5 GHz a s pojezdovým kolečkem

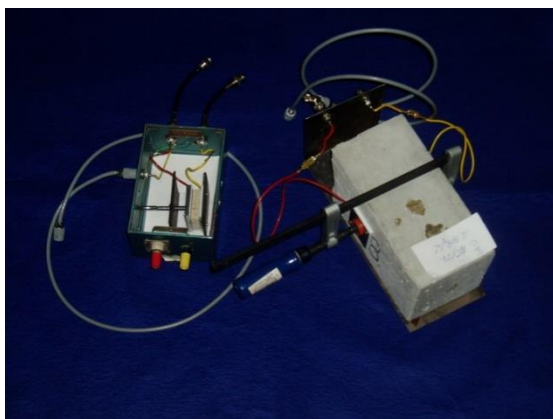
Saturace materiálu fyzikálně a chemicky vázanou vodou částečně absorbuje EM energii, čímž dochází k získání slabšího signálu odezvy. Toto oslabení signálu se může projevit ve snížení amplitudy odraženého signálu či časové prodlevy příjmu signálu. Díky tomu se snižuje jednak rozlišovací schopnost georadaru (čili jaké rozhraní materiálů dokážeme rozpoznat) a zároveň i přesnost pro lokalizaci jednotlivých materiálových rozhraní. K tomuto efektu lze nicméně přistupovat i jako k ukazateli obsahu vlhkosti v daném materiálu [75]. Některé zahraniční publikace uvádí i možnost rozpoznávat míru koroze výztuže v plošných železobetonových prvcích, jako jsou průmyslové podlahy apod. [76].

Sondy GPR jsou často vybavené zařízením měřící pohyb vysílače/přijímače v prostoru. V případě georadaru použitým v této práci, je pojezdové kolečko přímo připevněné na anténě georadaru viz Obr. 24. Pojezdem a současným snímáním odezvy na elektromagnetický budící signál, vzniká takzvaný lineární B-sken. Tento B-sken se skládá z hyperbolických odrazů od struktur ve skenované oblasti. Už z těchto skenů lze odhadovat rozložení jednotlivých elementů v hloubce, ale pro komplexní posouzení je tento výsledek nedostatečný.

Složením vhodného množství podélných a příčných B-skenů lze vytvořit objemový 3D sken objemu materiálu a pomocí různých softwarů jej interpretovat [77]. Pro tento účel je potřeba vzít v potaz charakter testované konstrukce, a co vlastně má být v konstrukci lokalizováno.

3.2.7 Impedanční spektroskopie

Tato metoda vychází z měření elektrických impedančních charakteristik měřené soustavy, která má uspořádání kov – zkoušený materiál – kov. Zkoušený materiál se v této soustavě chová jako dielektrikum. Zkoumáme tedy vlastnosti tohoto dielektrika. Indikátorem vlastností jsou frekvenční závislosti reálné a imaginární části impedance měřené soustavy a zejména frekvenční závislost ztrátového činitele zkoušeného materiálu. Pomocným indikátorem je frekvenční závislosti odporu a kapacity soustavy, do které byl zkoušený materiál zabudován.



Obr. 25: Testovací soustava



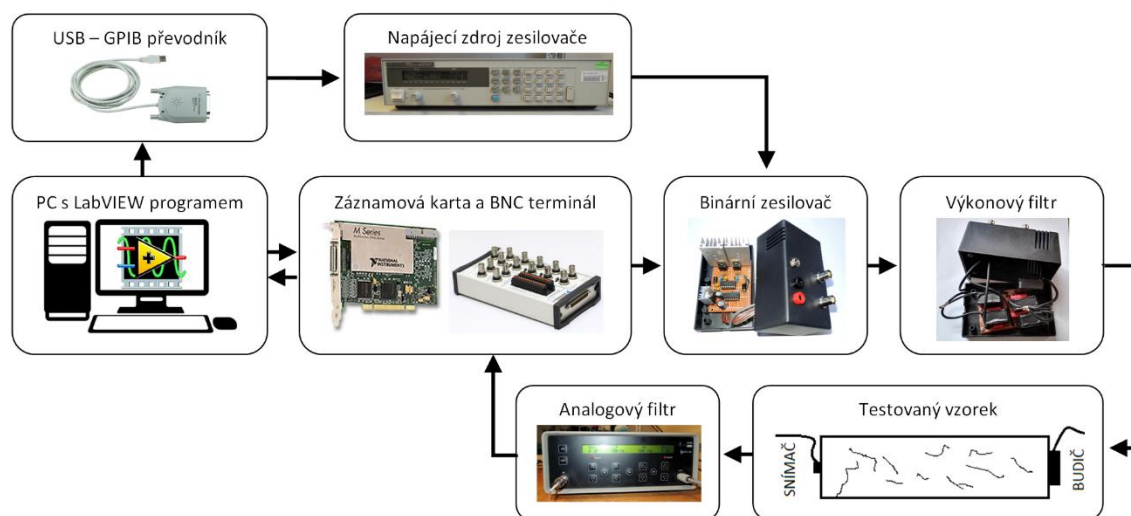
Obr. 26: Vyobrazení zařízení: zdroj střídavého napětí (RC generátor BM492), testovaný vzorek, dvoukanálový osciloskop, PC

Metoda je zaměřena na kvalitativní a kvantitativní vyhodnocení výše jmenovaných parametrů. Z charakteru křivek je možno detekovat vliv vlhkosti na zkoušený materiál, změnu jeho struktury, změnu pórovitosti, ztrátu životnosti, chyby v technologii výroby zkoumaného materiálu aj. Srovnáním výsledku s impedančním spektrem definovaného vzorku můžeme přesně poukázat na odchylky ve sledovaných vlastnostech.

3.2.8 Buzení pseudonáhodným signálem (MLS)

Jedná se o nedestruktivní akustickou pulzně-kompresní metodu zkoušení. Konvenční ultrazvuková metoda je dostatečná pro kovy, ale méně vhodná pro zkoušení materiálů s vysokým útlumem. Metoda Impact-Echo je použitelná pro měření pouze nízkých frekvencí (cca do 80 kHz), poté je signál ztracen v šumu. Metoda MLS (z ang. „maximum length sequence“ dokáže generací tzv. bílého šumu přenést do zkoušeného materiálu podstatně více energie než u metody Impact-Echo. Díky tomu snižuje zašumění signálu a dovoluje tak i zkoušení při použití vzduchu jako vazebného prostředku.

Měřicí zařízení je automatizované, skládá se z vybuzení signálu pseudonáhodné sekvence, záznamu vibrací vybuzeného zkušebního tělesa a poklesu vibrací a následné automatické analýzy záznamu. Schéma zařízení je uvedeno na Obr. 27. V jediném testovacím cyklu jsou získány tři parametry, které charakterizují lineární a nelineární chování vzorku.



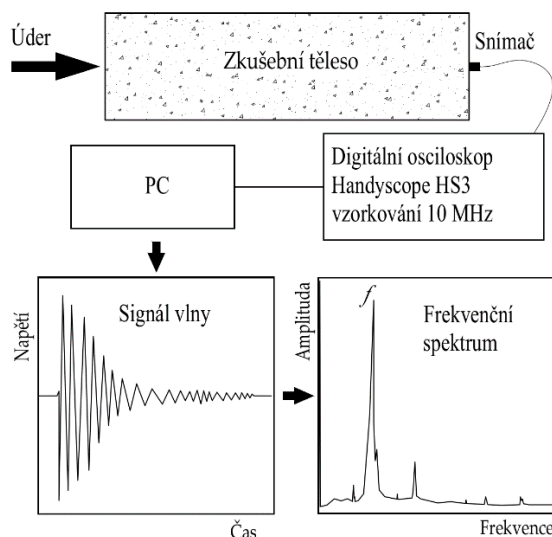
Obr. 27: Schéma aparatury pro měření pomocí MLS [78]

Využití pulzní komprese signálu je ve stavebnictví zcela neobvyklé. Teprve v posledních letech se zvyšuje četnost této problematiky v odborných časopisech. Velký potenciál se skrývá ve zmíněném spojení tří testovacích metod do jediné, ve vysoké testovací rychlosti a opakovatelnosti měření, ale také v teoretické možnosti testovat masivní prvky [78].

3.2.9 Princip metody Impact-Echo (IE)

Tato metoda je založená na vnášení mechanického vlnění do zkušební tělesa, jeho rozvibrování a záznam této vibrace. Vnášení vibrace se u komerčně používaných metod vyvozuje celou řadou ocelových sférických kladívek, které se liší hmotností a průměrem. Pro snímání vibrací se používají piezoelektrické snímače, které energii mechanického vlnění umějí přeměnit na analogový signál ve formě napětí. Dostaneme změnu napětí U v čase t . Tento signál v časové oblasti se zpracovává pomocí rychlé Fourierovy transformace, která je schopná signál převést na frekvenční spektrum. Takto získané spektrum je tvořeno závislostí napětí U na frekvenci f a spektrum lze dále analyzovat. Způsob zpracování spektra se liší dle aplikace na konkrétní konstrukci a dle cíle měření [55]. Základní kompozice pro měření metodou IE je znázorněna na Obr. 28.

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.4.3 Výpočetní vztahy, lze použít měřenou první dominantní frekvenci pro odhad tloušťky materiálu a jedná se přímo o původně zamýšlenou aplikaci metody IE [58]. Metoda je založená na přepočtením vztahu (10), který udává vztah mezi tloušťkou materiálu, rychlosti P vlny a první dominantní rezonanční frekvencí podélného kmitání. Na základě tohoto vztahu je možné přepočítávat změnu tloušťky například betonového ostění, tloušťky betonových prvků či lokalizovat trhliny a rozhraní různých materiálů [79; 80].



Obr. 28: Schéma principu testování pomocí metody IE [53]

V České republice lze tuto techniku přirovnat k rezonanční kladívkové metodě (ČSN 73 1372) [47], která se však omezuje na testování osamocených zkušebních těles, která nejsou zároveň součástí větších celků. Pro tuto normu též platí, že se využívají jednodušší měřicí zařízení, která sama lokalizují dominantní frekvence, čímž je jejich použití značně limitováno.

Dle vypracovaných zkušebních postupů můžeme uvést několik základních aplikací metody IE ve stavebním inženýrství:

- Stanovení integrity pilot.
- Lokalizace trhlin a prasklin uvnitř plošných prvků a určení hloubky trhliny relativně k rozměru (ASTM C 1383) [58].
- Kontrola mostních těles na přítomnost delaminace.
- Lokalizace nedostatečně ztuhnutého betonu.
- Kontrola stavu předepjatých a zainjektovaných napínacích hlav.
- Posouzení stavu degradovaných betonových prvků.

Výhoda těchto měření je v aplikaci čidla a buzení signálu na stejném povrchu. Metoda je tedy vhodná pro posuzování konstrukce, ke které je přístup pouze z jedné strany, jako jsou právě piloty, primární ostění tunelů, mostní těleso nebo betonové podlahy. Kromě posuzování pozice dominantní frekvence se dá metoda použít i pro měření rychlosti průchodu signálu zkušebním tělesem. U signálu v časové oblasti se dá určit útlum signálu.

3.2.10 Piezoelektrické senzory

Piezoelektrický jev prvně objevili bratři Curiové v roce 1880. Tímto jevem je možné převádět mechanickou deformaci na elektrické napětí a obráceně. Pokud na polarizovaný krystal působí napětí (tlakové či tahové), dojde ke vzájemnému posunu obráceně nabitých pólů v krystalu, čímž vznikne náboj. Tento jev se nazývá přímý piezoelektrický jev. Naopak jsou-li krystaly vystaveny elektrickému poli, začnou se deformovat, což se nazývá nepřímý (inverzní) piezoelektrický jev. Aby mohl náboj vzniknout, krystal nesmí mít střed symetrie. Polarita náboje závisí na orientaci krystalu vzhledem ke směru napětí. Nejčastější krystal používaný v piezoelektronice je monokrystalický křemen nebo křišťál. V praxi jsou však nejrozšířenější piezokeramické materiály, které patří do skupiny feroelektrických materiálů. Ty jsou téměř bezvýhradně založené na olovo-zirkonátu-titanátu (PZT); tzn. skládají se ze smíšených krystalů zirkonátu olova (PbZrO_3) a titanátu olova (PbTiO_3) [81]. Tyto typy snímačů snímají vibrace v materiálu a lze je rozlišovat na nízkofrekvenční (0-1000 Hz), středofrekvenční (1-100 KHz) a snímače akustické emise pro vysoké frekvence (100-2000 KHz) [82].

3.3 Softwarové nástroje a programy

Pro zpracování dat v oblasti vibroakustiky jsou měřená data zpracována výhradně skrze software, ať už dodávaný přímo výrobcem měřicí aparatury, nebo pomocí licenčních či open-source knihoven a toolboxů. Pro tuto aplikaci je často limitující právě licence softwaru, jehož výrobce jasně definuje, k čemu lze danou licenci využívat. Tím vzniká situace, kdy k měřicí aparatuře je v mnoha případech nutné pořídit i neméně nákladný software. Toto je typický příklad u sofistikovaných diagnostických metod, jako je například akustická emise.

Naopak jiné metody lze používat s využitím základního laboratorního vybavení a lze se velice dobře přiblížit výsledkům ekvivaletním komerčním systémům dodávaných takříkajíc na klíč. Tento příklad lze uvést na metodě Impact-Echo, kde jednotliví výrobci dodávají sofistikované měřicí aparatury s mechanickými budiči rázů, společně s vyhodnocovacím softwarem. Tento typ aparatury lze dobře nahradit relativně levnějšími samostatnými snímači - například vícekanálovými digitálními osciloskopy,

které v dnešní době poskytují jednak dostatečný rozsah záznamové frekvence, bitového rozlišení i dostatečný datový tok, takže bez problému dovolují kontinuálně zaznamenávat v řádově MHz frekvencích i minutu dlouhé signály.

Následné vhodné zpracování měřených signálů je pak otázkou volby vhodného softwaru, který disponuje potřebnými funkcemi.

3.3.1 Rychlá Fourierova transformace

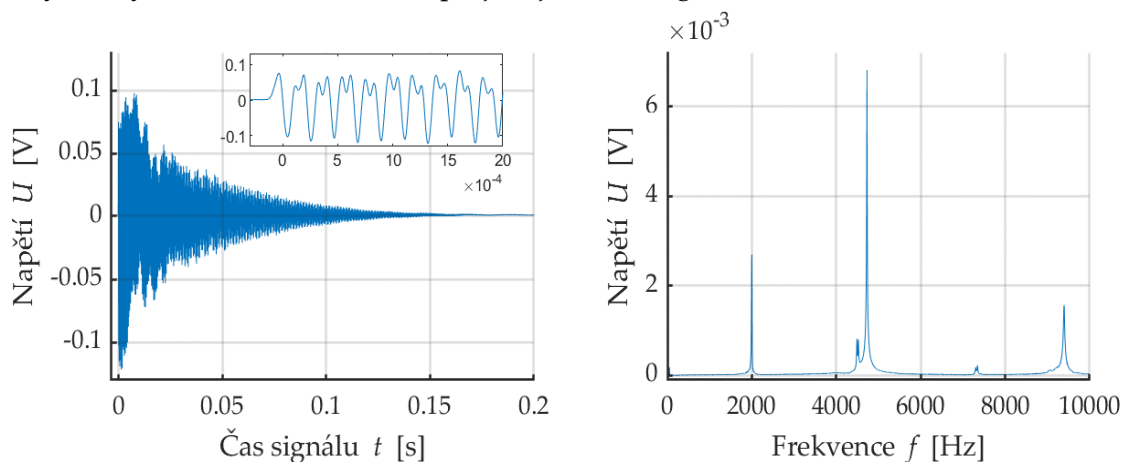
Akustické NDT metody často pracují s měřenými signály, které se skládají ze změny napětí U na čase t . Lze je rozlišit na stacionární či ergodické⁴ signály. Tyto signály lze vyjádřit mnoha různými způsoby, důležité jsou časové a frekvenční reprezentace. Ve Fourierově transformaci je signál porovnáván s komplexní sinovou funkcí, a protože je prováděn přes celou časovou reprezentaci, je frekvenční spektrum nezávislé na čase. Analýza takto vytvořeného frekvenčního spektra je jedním z standardizovaných a užitečných nástrojů pro studium signálů.

V rámci tohoto zpracování je často zmiňována diskrétní Fourierova transformace, zpětná Fourierova transformace či rychlá Fourierova transformace. Právě ta se v praxi využívá nejčastěji díky nižšímu nároku na výpočetní výkon. Algoritmus rychlé Fourierovy transformace (FFT) byl vyvinut v roce 1965. Rychlá Fourierova transformace [83] lze vyjádřit následovně $f(t)$:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (15)$$

Tato transformace umožňuje rozložit signál do jednotlivých frekvencí, ze kterých je signál složen. Jedná se o přibližný odhad jednotlivých frekvencí ω krátkého časového úseku signálu t_0 .

Příklad signálu z měření metodou IE, a jeho frekvenční spektrum vytvořené pomocí FFT, je znázorněn na Obr. 29. Tento graf zároveň dokumentuje typický pulsní signál v slyšitelných frekvencích, kde se projevuje útlum signálu.



Obr. 29: Příklad signálu a jeho frekvenční spektrum vytvořené pomocí FFT

⁴ Za ergodický signál můžeme považovat takový, jehož frekvenční spektrum získané Fourierovou transformací, lze získat z jedné dostatečně dlouhé části signálu. Tvar frekvenčního spektra se tedy v signálu nemění

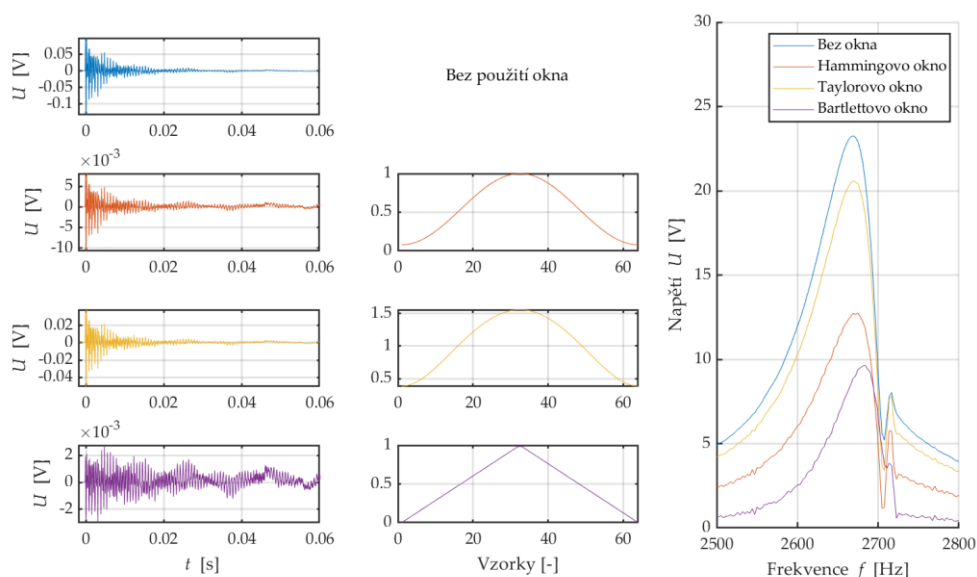
Vzniklé frekvenční spektrum je pak možné dále posuzovat a analyzovat. Tento postup patří k nejčastějším nástrojům, jak analyzovat signály z metody IE, jak dokládá výčet zahraničních publikací a norem [52], [61], [84] [58], [85]. Nejčastěji je pak posuzována první dominantní frekvence, popřípadě její další harmonické frekvence.

Přítomnost defektu, praskliny, dutiny či jiného materiálového rozhraní s výrazně odlišnou akustickou impedancí pak ovlivní i výsledné frekvenční spektrum, a to posunem dominantních frekvencí do vyšších či nižších oblastí.

3.3.2 Spektrální okna

V mnoha diagnostických aplikacích je zaznamenáván kontinuální signál, generovaný rozličnými typy snímačů a čidel. Tyto signály v sobě mohou obsahovat kromě měřených jevů i cizí, parazitní šumy pozadí a vnějšího prostředí (vibrace od okolní dopravy, vibrace od strojů v továrně apod.) [86].

Pro další zpracování signálu například metodami FFT či CWT je přítomnost šumu nežádoucí, protože v průběhu analytického zpracování dat dochází k deformaci výstupních dat. Použité algoritmy v rámci signálu nerozlišují mezi šumem a vlastním signálem snímače a je proto potřeba tento krok provést před samotnou aplikací analytické metody. Případná deformace vytvořeného frekvenčního spektra se nazývá jako spektrální únik (z ang. „spectral leakage“) [87]. Tento jev se projevuje ve spektru vznikem velmi vysokého počtu zdánlivých poklesů, tj. relativně malých a frekvenčně shodně vzdálených lokálních minim. Současně může docházet k ponížení amplitudy frekvenčního spektra, což dále znesnadňuje interpretaci zaznamenaného signálu. Příklad takto deformovaného signálu a aplikaci různých oken je znázorněn na Obr. 30.



Obr. 30: Srovnání různých vyhlazovacích spektrálních oken (vlevo a uprostřed) a výřez konkrétního dominantního frekvenčního vrcholu (vpravo)

Uvedený obrázek dokumentuje vstupní signál vyznačený modrou barvou a poté efekt různých vyhlazovacích oken. Je zde uvedena jak transformace signálu vybraným oknem, tak tvar vyhlazovacího okna (uprostřed) a rovněž je znázorněn efekt na výsledné frekvenční spektrum. Jedná se o signál z měření metodou IE na vysokopevnostním betonu, degradovaného teplotou 800 °C (konkrétně receptura B testována v této práci).

Tyto signály jsou zpravidla výrazně zašuměné a stanovení správné dominantní rezonanční frekvence je tedy obtížnější úkol než u referenčních nedegradovaných zkušebních těles.

Uvedený praktický příklad aplikace spektrálního okna dokazuje možnost úpravy, či zpřesnění výstupního frekvenčního spektra. Po použití jednotlivých oken lze zpozorovat snížení lokálních minim frekvenčních vrcholů a zároveň i mírný frekvenční posun. Velikost změny této rezonanční frekvence je největší pro vyhlazení Barlettovým oknem, kdy výsledná frekvence je 2,68 KHz oproti frekvenci bez použití okna, která je rovna 2,67 KHz. Z těchto hodnot lze soudit, že aplikace okna neovlivňuje výrazně měřenou frekvenci, pokud se pohybujeme v této frekvenční oblasti (v řádech jednotkách KHz). Zároveň došlo ke snížení amplitudy, což umožňuje jednoduší lokalizaci dominantního vrcholu.

Lze předpokládat, že změna vlastní frekvence do jednotek Hz bude hrát větší roli, například v případě měření vlastních vibrací masivních konstrukcí, jako jsou budovy, mosty či jiné těžké konstrukce s nízkou rezonanční frekvencí. Tyto konstrukce dosahují většinou vlastní frekvence v řádu jednotek a desetin Hz [88]. Vliv spektrálního úniku v tomto případě hraje větší roli, a je tedy potřeba použít vhodný typ vyhlazovacího okna.

Vzhledem k testovaným vyhlazovacím oknům bylo v této práci použito Hammingovo okno, které dostatečně redukuje vliv šumu.

3.3.3 Časově frekvenční transformace

Kontinuální vlnová transformace (ang. přek. „Continuous wavelet transformation“ – dále jen CWT) je technika, kterou je možné zachovat i časovou osu v posuzovaném signálu a vytvořit takzvaný skalogram (ang. přek. „scalogram“), který vznikne filtrováním vstupního signálu pomocí mateřské vlny $\psi(t)$. Výsledný skalogram obsahuje magnitudu jednotlivých frekvencí v čase. Právě od slova rozsah (ang. přek. „scale“) je slovo odvozeno a skalogramy nám umožňují výběrem vhodného rozlišení detailněji posuzovat v rámci skalogramu nižší či vyšší frekvenční oblasti.

Transformace CWT je definována integrální rovnicí:

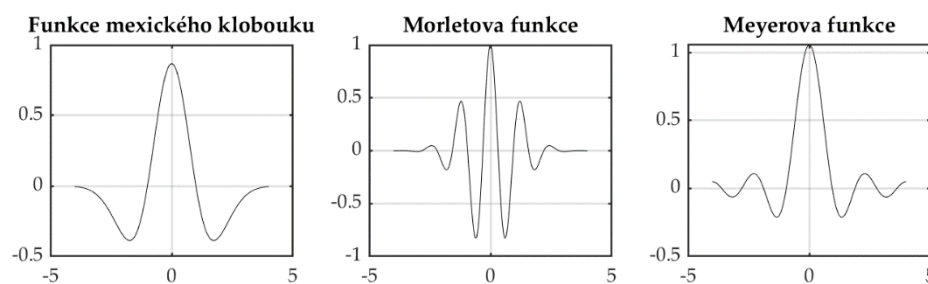
$$WT(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi_{\tau, s}(t) dt \quad (16)$$

kde:

$$\Psi_{s, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \Psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) \quad (17)$$

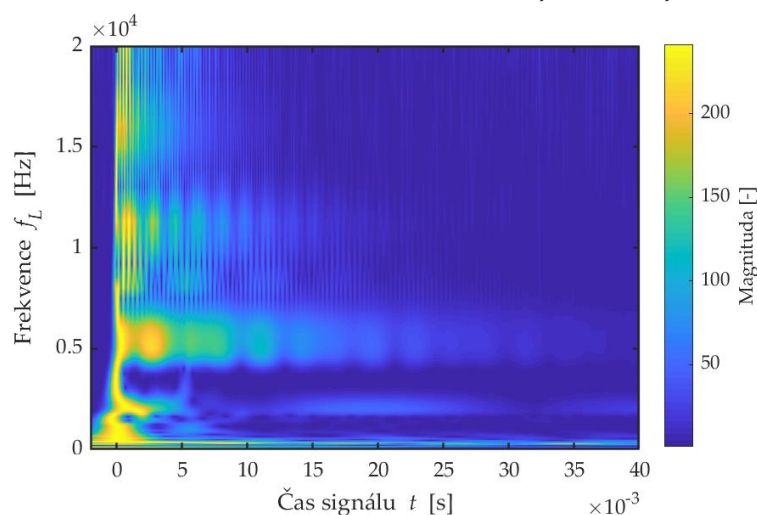
Kde τ je časové posunutí, s je měřítko, které je svázáno s frekvencí, Ψ je transformační funkce, která se nazývá základní nebo také mateřská funkce, $x(t)$ je analyzovaný signál a $WT(\tau, s)$ je výsledná časově frekvenční transformace [89].

Obvyklé techniky studující vlastnosti signálů, které nejsou zřetelné v časové oblasti, jsou porovnány s danou časovou funkcí s vhodně vybranou základní funkcí. U Fourierovy transformace je základní funkcí Ψ komplexní harmonická sinova funkce. V případě metody CWT se využívají jiné mateřské funkce, kde mezi hlavní příklady lze uvést funkci mexického klobouku, Morletovu funkci a Meyerovu funkci [90]. Srovnání jednotlivých mateřských funkcí je znázorněno na Obr. 31.



Obr. 31: Příklad různých mateřských funkcí využívaných pro CWT [90]

Tuto techniku začalo využívat více autorů [91], například G. Epasto a kolektiv [84] uvedl, že právě skalogram může být posunem v oblasti viborakustické diagnostiky co do schopnosti interpretace naměřených dat. Skalogramy stejně jako frekvenční spektra obsahují dominantní frekvence, ale navíc jsou schopné poskytnout lepší porozumění například zašuměným signálům, či detekovat případné chyby měření, jako jsou nechtěné rezonance zkušebních těles, či vibrace od vnějších zdrojů.



Obr. 32: Příklad skalogramu ze signálu z podélného zkoušení metodou IE receptury A referenčního tělesa

V rámci této práce byla též zvolena metoda CWT jako další algoritmus pro interpretaci měřených akustických signálů metodou IE. Pro zpracování jednotlivých skalogramů byla zvolena mateřská Meyerova funkce.

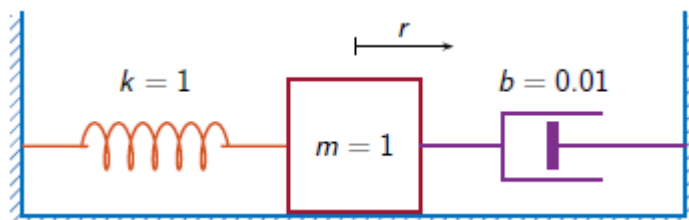
Skalogram uvedený na Obr. 32 byl zpracován z akustického signálu uvedeného v kapitole 3.3.1 Rychlá Fourierova transformace a jedná se tedy o signál z testování IE referenčního zkušebního tělesa.

3.3.4 Funkce frekvenční odezvy

V konstruktérské praxi je velice často potřeba zajistit stabilní chování při dynamickém namáhání konstrukce. Tento typ namáhání se projevuje v případě, kdy je konstrukce namáhána střídavým mechanickým vnějším působením nebo vlastní prací konstrukce. Výsledkem je rozkmit konstrukce, kdy dochází k lokální deformaci dané konstrukce. Tento stav tak můžeme popsat svou vlastní frekvencí f , s modální maticí $[\psi]$ a s poměrným útlumem ζ [92].

Deformační tvar popisuje průběh deformace při konkrétní vlastní frekvenci konstrukce a ukazuje, jakých mezních deformací dosahují jednotlivé části konstrukce

mezi sebou navzájem. Tento deformační tvar při dané frekvenci označujeme frekvenční módy konstrukce a v závislosti na tuhosti k může být pozorována přítomnost několika různých módů. Pro stanovení těchto deformačních módů a vlastních frekvencí konstrukce byla vyvinuta celá řada zkušebních postupů a algoritmů, ze kterých můžeme zmínit takzvanou funkci frekvenční odezvy (ang. přek. „frequency response function“, zkráceně FRF). Tyto funkce jsou založené na matematickém odhadu vlastních módů a frekvencí na základě experimentálně změřených dat, nebo modelových dat.



Obr. 33: Znázornění vztahu mezi hmotností oscilátoru, tuhostí a útlumem v modelu SISO [92]

Vzhledem k zaměření této práce je zde více popsána FRF aplikovaná v oblasti experimentálně změřených dat. Zde jsou definovány celé přístupy v testování jako systémy, které lze rozdělit do dvou typů:

- SISO – jeden vstup – jeden výstup (ang. přek. „single input, single output“),
- MISO – více vstupů – více výstupů (ang. přek. „multi-input, multi-output“).

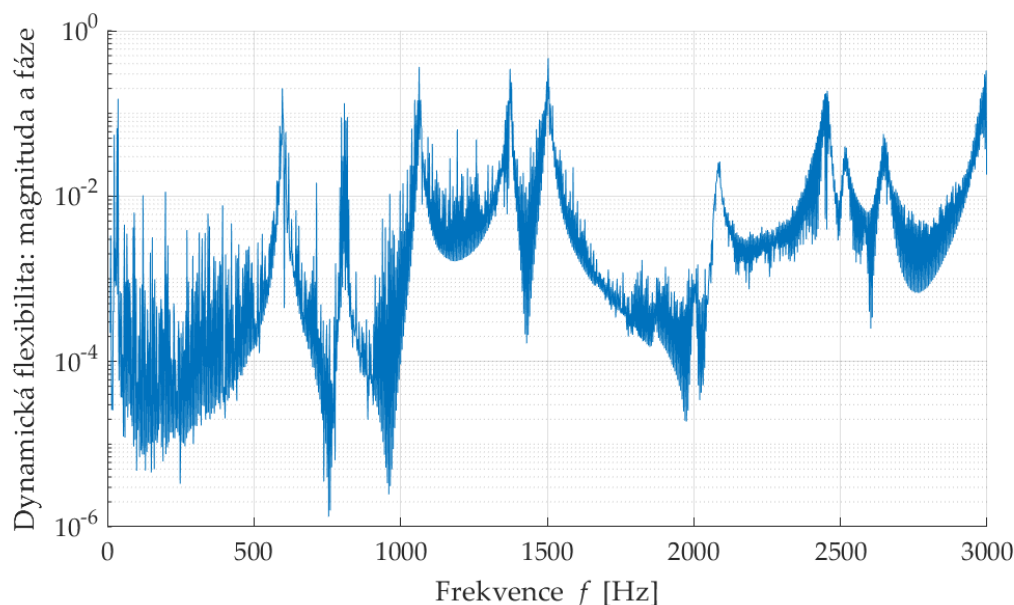
V této práci byly dále využity přístupy systému SISO. Základní podobu frekvenční odezvové funkce, která je základem odezvového modelu, lze vyjádřit jako:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (18)$$

kde: $H(f)$... funkce FRF,
 $Y(f)$... výstupní signál v pozici 1 (odezva systému na buzení),
 $X(f)$... vstupní signál v pozici 2 (budící signál) [93].

Při praktické realizaci experimentální modální analýzy pak lze popsat celé měření z pohledu uložení měřeného tělesa, způsobu buzení a typu použitých snímačů. Postup použitý v této práci je odvozen od teoretických základů experimentální modální analýzy a do jisté míry využívá postupy prezentované v publikaci A. Gupta [94].

Způsob uložení měřené struktury je dán účelem měření, lze jej rozlišit na měření volné (ideálně uchycené na pružném závěsu) nebo na pružných podložkách, tak aby podpůrná struktura nevytvářela vnucené uzly. Uzly se mohou v jednotlivých módech nacházet v různých bodech konstrukce a jedná se o body, ve kterých je výchylka tělesa vlivem vibrace minimální.

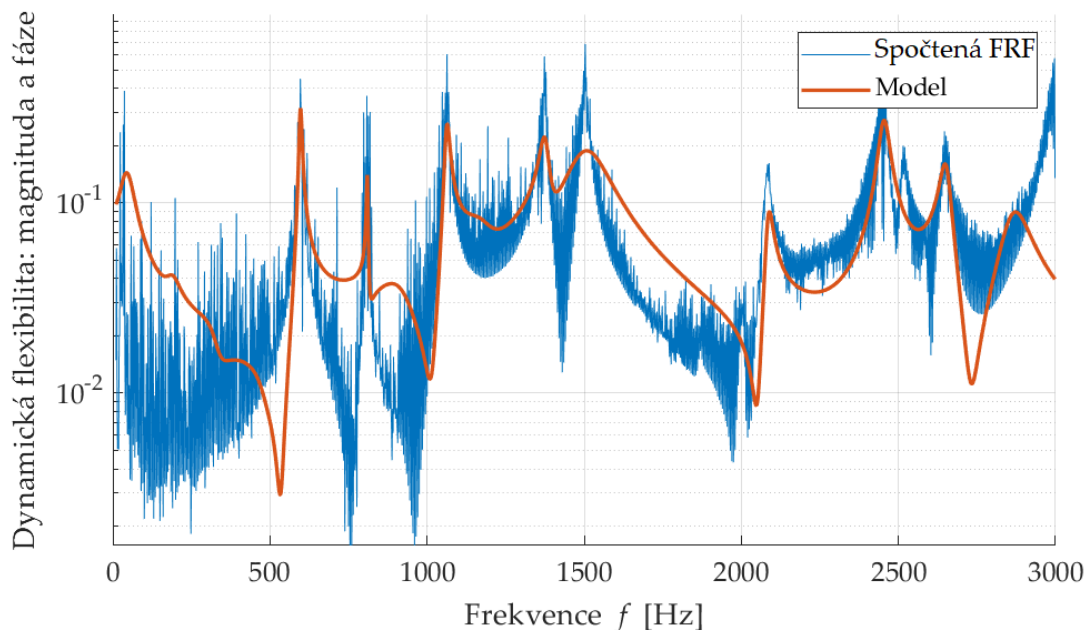


Obr. 34: Výstup dílčího měření pomocí FRF

Vetknutí konstrukce je složitější variantou a často je zapříčiněno charakterem zkoušené konstrukce, kde nelze použít pružný závěs, či rozpojit konstrukci. U tohoto typu uložení je často obtížnější vytvořit adekvátní model, který by dobře koreloval s experimentální modální analýzou. Varianta experimentální analýzy in situ je pak typická například pro měření vlastních modálních frekvencí u staveb, jako jsou mosty či železobetonové skelety, obecně u velkých konstrukcí napevno zabudovaných do větších celků [95].

Pro buzení kmitů lze popsat v zásadě dva přístupy: snímač odezvy je na jednom místě konstrukce, a budící impuls se postupně pohybuje po vhodně zvolené síti bodů konstrukce; buzení vlastních kmitů je v jednom bodě, a naopak se pohybuje umístění snímače. Pro buzení vlastních frekvencí se používají buď harmonické signály, náhodné signály či impulzní rázové buzení pomocí modálního kladívka. Pro různé typy konstrukcí se též využívají různé typy modálních třepaček, které rozkmitávají konstrukci v nízkých frekvencích [96]. Běžně se měří posuvné stupně volnosti (směry X, Y, Z) a hustota měřících bodů do značné míry záleží na frekvenčním rozsahu měření. Platí, že čím vyšší mód tím je jeho tvar složitější a tím více bodů je potřeba k jeho realistickému vykreslení.

Při samotném experimentálním měření v závislosti na zvolené sestavě budiče a snímače odezvy, postupně vzniká matice FRF, kde řádky a sloupce odpovídají jednotlivým bodům zvolené měřící sítě. Příklad konkrétní podoby dílčího měření matice FRF je znázorněn na Obr. 34. V praxi mají reálné konstrukce nejčastěji mnoho stupňů volnosti a pro stanovení vlastních frekvencí korespondující s jednotlivými módy je potřeba provést aproximaci takto získané FRF. Optimální volbu pro aproximační funkci lze realizovat na základě odhadu jednotlivých vlastních frekvencí dané konstrukce. To lze například pomocí zpracování stabilizačního diagramu (v příloze na Obr. 144) [93].



Obr. 35: Křivka FRF proložená aproximační funkcí metodou špička-amplituda

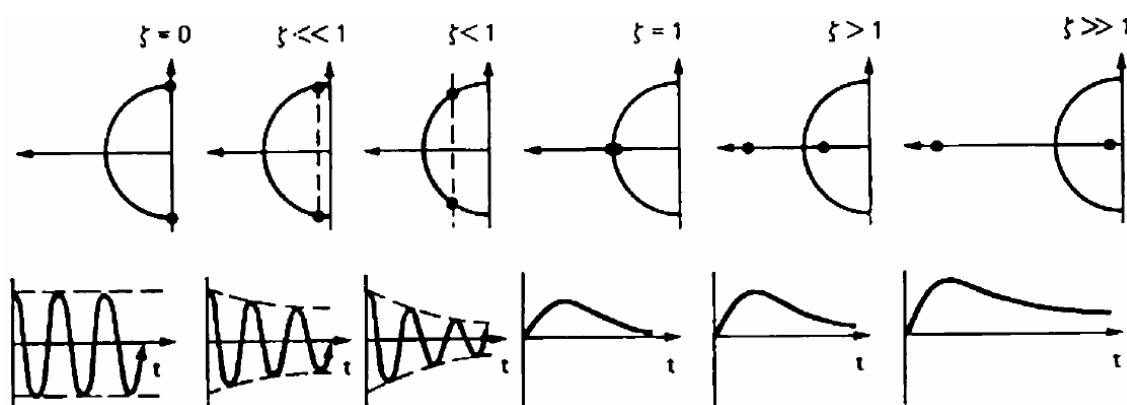
Pomocí stabilizačního diagramu tak lze odhadnout stabilní frekvence, které korespondují s vlastními módy v daném testovaném místě zkušební matice. Na základě takto stanovených frekvencí lze pomocí metody špička-amplituda vytvořit aproximační funkci, kterou můžeme relativně přesně stanovit vlastní frekvence, tvarové módy a útlum v jednotlivých bodech zkušební matice. Příklad aproximační modelové funkce aplikované na reálném měření je znázorněn na Obr. 35 [97]. Tato funkce lze dobře použít v případě, že jednotlivé frekvenční módy jsou od sebe dostatečně frekvenčně vzdáleny.

Součástí výstupu měření modální analýzy je modální matice $[\psi]$ obsahující deformační tvary v podobě komplexního čísla, vlastní frekvence f_i a jejich příslušné koeficienty útlumu ζ_i . Výsledné deformační tvary pak lze vizualizovat vhodnou zobrazovací technikou a lze znázornit, jak testovaný objekt při jednotlivých frekvencích kmitá a k jaké maximální deformaci může docházet.

Poměrný útlum ζ nabývá hodnot v rozmezí tří stavů a to:

- $\zeta = 0 \dots$ netlumené kmitání,
- $\zeta < 1 \dots$ tlumené kmitání,
- $\zeta \geq 1 \dots$ aperiodický pohyb.

Příklad charakteru kmitavého pohybu s různou hodnotou poměrného útlumu lze znázornit pomocí Obr. 36 [93].



Obr. 36: Poloha pólů v závislosti na hodnotě poměrného útlumu [93]

3.3.5 Koeficient korelace

Pro popis závislosti mezi výsledky měřených veličin x a y různých metod lze hovořit o korelaci těchto měřených veličin. Korelační analýza se zabývá mírou závislosti obecně náhodných dat. Výstupem této analýzy nazýváme korelační koeficient R_{cor} , který nabývá hodnot od -1 do +1. Pro výpočet koeficientu korelace lze použít tyto vztahy:

$$R_{cor} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{S_x S_y (n - 1)} \quad (19)$$

$$R_{cor} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (20)$$

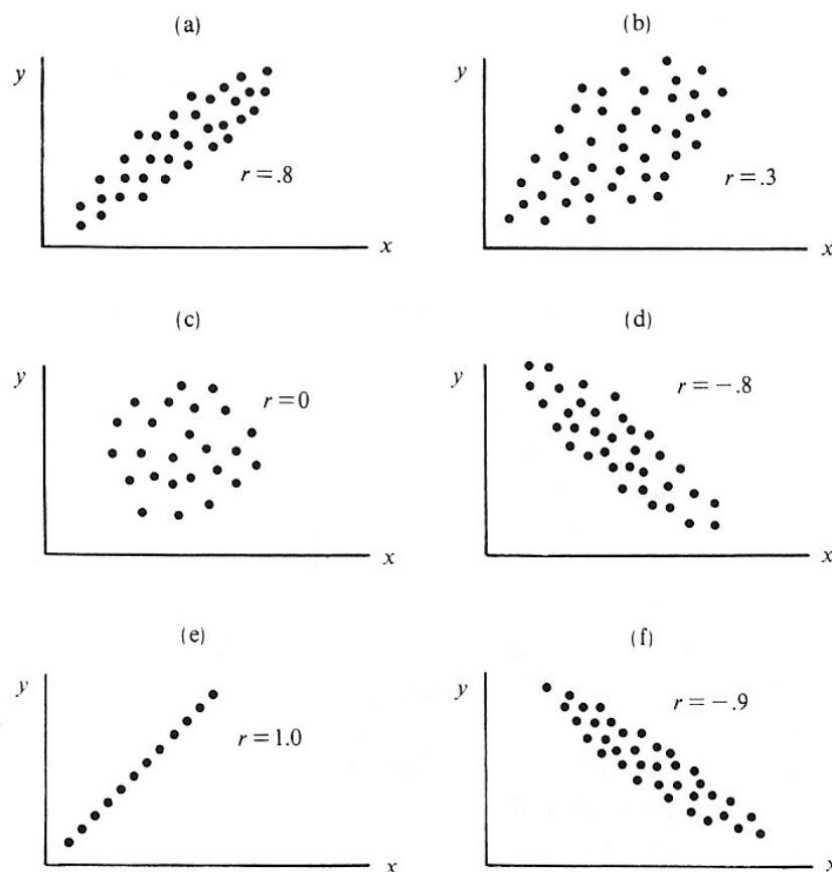
Kde:

- $x_i \dots$ i -tá hodnota měřené veličiny x ,
- $\bar{x} \dots$ průměrná hodnota veličiny x ,
- $y_i \dots$ i -tá hodnota měřené veličiny y ,
- $\bar{y} \dots$ průměrná hodnota veličiny y ,
- $S_x \dots$ směrodatná odchylka veličiny x ,
- $S_y \dots$ směrodatná odchylka veličiny y ,
- $n \dots$ počet měřených veličin.

Pokud vyjádříme R_{cor}^2 dostáváme koeficient determinace, který nabývá hodnot 0 až +1 vyjádřeno v procentech. Tímto koeficientem lze nejlépe vyjádřit závislost mezi proměnnými x a y [98].

V rámci korelace proměnných pak může nastat několik limitních situací: $R=1$ dokonalá kladná korelace, $R_{cor}=0$ žádná korelace, $R_{cor}=-1$ dokonalá záporná korelace. Tyto stavy popisuje Obr. 37. Jednotlivé stavy korelace lze též nazvat dle Evansovy příručky [99] rozsahy pro R_{cor}^2 . Jednotlivé korelační rozsahy stanovené v Evansově příručce pro účely této práce jsou upraveny do následující podoby:

- 0,00 – 0,60 – velmi slabá korelace,
- 0,61 – 0,80 – slabá korelace,
- 0,81 – 0,90 – střední korelace,
- 0,91 – 1,00 – silná korelace.



Obr. 37: Příklady limitních stavů korelace dvou proměnných x a y [99]

Pokud chceme použít nedestruktivní metody testování pro popis fyzikálně mechanických vlastností, je potřeba aby mezi těmito metodami existovala nejlépe silná až velmi silná korelace. V takovém případě lze vytvářet kalibrační model, který umožňuje vyjádřit například pevnost v tlaku z nedestruktivního měření. Tyto kalibrační přepočtové modely jsou typické například při přepočtu nezaručené pevnosti v tlaku z tvrdoměrných metod na pevnost v krychelném tlaku, nebo pro přepočtové vztahy mezi dynamickým modulem pružnosti a statickým modulem pružnosti.

V rámci použitých metod ideálně vznikne pro každou teplotní sadu jedno reprezentativní měření, které definuje tuto teplotní sadu dané receptury. Tím má zvolená metoda testování v rámci jedné receptury 7 měřených hodnot, které lze korelovat s dalšími metodami měření na ostatních recepturách. Optimálně tedy vznikne korelační tabulka, která umožní porovnat korelaci mezi jednotlivými metodami. V rámci této práce tak byla provedena korelace mezi jednotlivými použitými kvantitativními metodami, a jejich výsledky.

4 Experimentální část

Soubor experimentů je rozdělen do 4 částí, ve kterých jsou postupně sumarizovány počáteční kalibrace a měření pro definici měřitelných rozsahů vybraných metod. Jak bylo zmíněno v teoretické části, vibroakustické metody jsou z velké části založené na záznamu, vyhodnocení a analýzy akustických signálů. Proto je potřeba kalibrovat vybrané metody a přístroje pro jednotlivé měření takovým způsobem, aby byly uloženy veškeré potřebné informace pro následnou analýzu. Ta ve většině případů nastává až po provedení samotného měření a uložení dat, a je tedy kladen důraz na záznam měřených veličin v co největším rozlišení.

4.1 Kalibrace vybraných metod

Z pohledu přístrojového vybavení byly optimalizovány měřící parametry pro vybrané akustické metody testování. Pro tento účel byl využit převážně digitální osciloskop Handyscope, který je díky relativní jednoduchosti po přístrojové stránce a bohaté variabilitě po programové stránce optimálním nástrojem pro jednoduché kalibrace i komplexní měřící postupy, jako jsou modální analýza či akustická emise.

4.1.1 Záznamové zařízení pro testování

Pro záznam budících signálů a odezvy zkušebních těles byl použit digitální osciloskop Handyscope HS3AWG-5 s rozlišením 16 bitů a s maximální frekvencí sběrnice 195 KHz při daném rozlišení. Tento osciloskop se připojuje pomocí USB konektoru a dá se využít také jako multimetr nebo jako generátor signálu (viz Obr. 38). Pro snímání vybuzeného signálu byl použit piezoelektrický snímač typ MIDI 446s12 dodaný firmou ZD Rpety – Dakel (Obr. 39:).

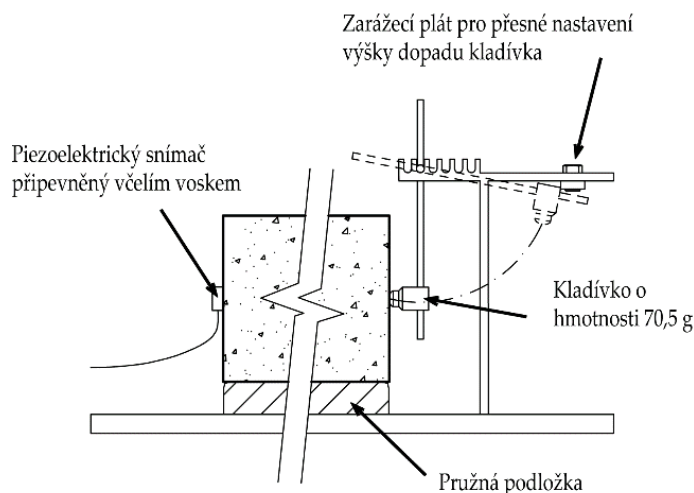


Obr. 38: Digitální osciloskop HS3



Obr. 39: Piezoelektrický senzor MIDI 446s12

Zkušební trámce se upínají do přípravku s pružnými podložkami a kladívkem o hmotnosti 70,5 g. Toto kladívko je upnuté způsobem, který dovoluje nastavit výšku ze které dopadá na zkušební těleso (Obr. 40). Tímto způsobem je zaručena totožnost vybuzeného impulsu mechanického vlnění pro všechna měření.



Obr. 40: Schéma zkoušení metodou IE

Na zkušebních tělesech proběhlo měření v podélném směru kmitání první dominantní frekvence $f_{l,1}$, v příčném směru kmitání první dominantní frekvence $f_{t,1}$ a druhé dominantní frekvence $f_{t,2}$ a první dominantní frekvenci při měření krouživého kmitání f_i .

Piezoelektrický snímač je třeba připevnit ke zkušebnímu tělesu tak, aby mezera mezi snímačem a zkušebním tělesem byla co nejmenší a snímač zároveň pevně držel. Jako vazebný prostředek mezi snímačem a zkušebním tělesem lze použít různé typy lepidel, kalafunu či různé typy vosků. Vzhledem ke kombinaci množství zkušebních těles a jednotlivých zkušebních poloh byl jako vazebný prostředek zvolen včelí vosk z důvodu snadné manipulace a aplikace na zkoušené trávce.

4.1.2 Stanovení vlhkosti měřených vzorků

Akustické parametry stavebních materiálů mohou být ovlivněny obsahem vlhkosti v podobě fyzikálně vázané vody. Jak bylo popsáno v kapitole 1.4.2 Vliv vlhkosti a teploty, obsah volné vody uvnitř porézní struktury vede k navýšení rychlosti šíření mechanické vlny uvnitř materiálu. Pro stanovení hmotnostní vlhkosti byla použita norma ČSN EN ISO 12570 [100]. Hmotnostní vlhkost W_h je pak dána vztahem:

$$W_h = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (21)$$

kde: W_h ... hmotnostní vlhkost [%],

m ... hmotnost mokrého vzorku [kg],

m_0 ... hmotnost vysušeného vzorku [kg].

Hodnota hmotnostní vlhkosti je tedy poměrem obsahu vypařitelné vody ku suchému vzorku a jedná se tedy o poměr, který lze též vyjádřit v %. Vlhkost vzorků byla tímto způsobem zjišťována ve fázi sušení zkušebních těles v sušárně, kdy byla zjištěna hmotnost před i po sušení. Sušení bylo nastaveno na 72 hodin při 110 °C. Tento postup byl využit pro všechny receptury.

Pro nedestruktivní měření vlhkosti byla též použita kapacitní vlhkosní sonda dodávána firmou Testo. Jedná se o sondu TESTO 616, která je kalibrována pro použití

na dřevo, beton, potěry a omítky. V případě měření betonů je maximální měřená hodnota 20 %. Výrobce garantuje schopnost měřit obsah vlhkosti až do 5 cm hloubky testovaného materiálu [101].



Obr. 41: Vlhkostní kapacitní sonda TESTO 616

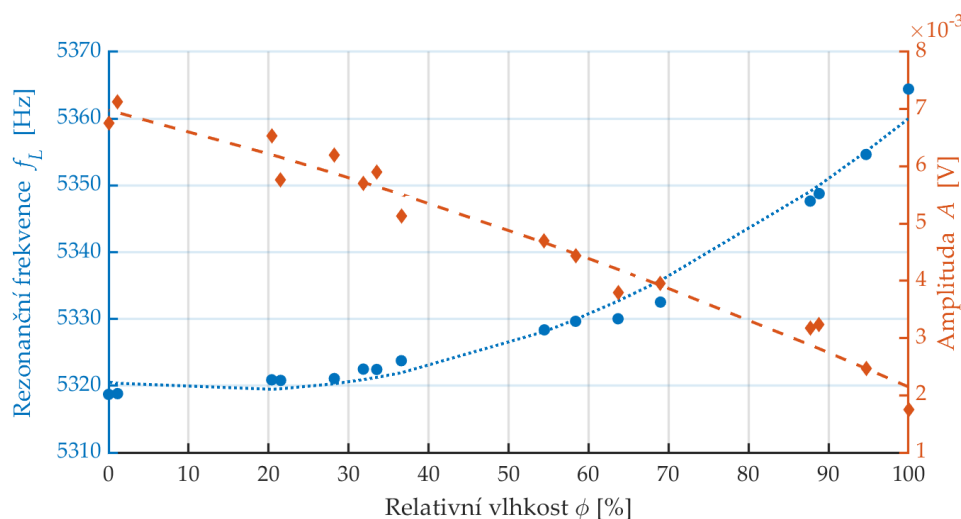
V případě měření na zkušebních tělesech typu trámec (o rozměru 100×100×400 mm) tak probíhalo měření vždy ve třech bodech kolmo na směr hutnění. Výsledná hodnota byla zprůměrována. Tato průměrná hodnota nedestruktivně měřené vlhkosti vzorku lze označit ϕ_T [%].

4.1.3 Vliv vlhkosti na rezonanční frekvenci

Při testování vibroakustickými metodami zkušebních betonových trámců je potřeba brát v potaz možný vliv okrajových podmínek či nasycení objemu betonových těles vodou a jejich vliv na měřenou rezonanční frekvenci.

Kromě rychlosti zvuku v betonu dochází i k posunu ve frekvenční oblasti, jak bylo v minulosti doloženo několika různými autory [102; 56; 75]. Například L. Carbol provedl měření frekvenční měření cementových malt při vysušování. Ukázalo se, že zkušební tělesa trámců 40×40×160 mm mají v maximálním stavu nasycení vodou vyšší rezonanční frekvenci než ve vysušeném stavu. Rezonanční frekvence tak dosahovala 12,55 KHz při 100% relativní vlhkosti a 12,28 KHz při 30% relativní vlhkosti.

Z tohoto důvodu bylo podobné měření provedeno i na vybraných zkušebních těles receptury B, které byly nasyceny vodou ve vodní lázni po dobu 7 dnů a poté byla měřena vlastní rezonanční frekvence v podélném směru f_L . V průběhu tohoto měření byl využit přípravek znázorněný na Obr. 40, čili bylo zajištěno, že jednotlivé úder byly vedeny stále stejnou silou. Byla tedy sledována rezonanční frekvence a změna amplitudy.



Obr. 42: Závislost podélné rezonanční frekvence a amplitudy na relativní vlhkosti zkušebních trámů

Z provedených měření jde vidět, že podobně jako tomu je u malt dosahuje vlastní rezonanční frekvence nejvyšší hodnoty při 100% nasycení vodou. Se snižující se vlhkostí pak dochází k poklesu frekvence. V rámci tohoto experimentu byly zkušební tělesa pro dosažení 0% vlhkosti vysušena v laboratorní sušárně. Celkový rozdíl mezi 0 a 100% relativní vlhkostí je přibližně 44 Hz. V případě vlhkostního stavu betonu při běžné pokojové vlhkosti 0-60 % se vlastní rezonanční frekvence pohybuje v rozmezí 5,32-5,33 KHz.

Amplituda měřeného signálu je však podstatně více ovlivněna. Rozdíl v měřené amplitudě dominantní frekvence mezi plně nasyceným stavem a zcela vysušeným stavem činí až 70 %. Voda tak způsobuje vyšší akustický útlum, ale přitom výrazně neovlivňuje měřenou rezonanční frekvenci.

Z pohledu testování teplotně degradovaných zkušebních těles, tak jak jsou navrženy v této práci je však důležité podotknout, že po výpalu jsou zkušební tělesa v podstatě vysušená a vliv vlhkosti je tedy zanedbatelný při následujícím testování.

4.1.4 Kladívko se snímačem

Pro účel testování železobetonového plošného prvku bylo použito kladívko se zabudovaným budičem, jak lze vidět na fotkách Obr. 43-Obr. 47.



Obr. 43: Kruhový snímač s detailem upevnění v kladívku

V porovnání s klasickým kladívkem je zde umožněno zaznamenat energii budícího impulsu a energii odezvy měřené soustavy na budící signál. V rámci tohoto nástroje byla provedena kalibrace a srovnání různých kombinací buzení a jejich vliv na výsledné frekvenční spektrum. V rámci této kalibrace byl požadavek na výběr kombinace typu úderu, rukojetě a hrotu na výsledné zaznamenané signály. Jedná se tedy o metodickou analýzu postupu samotného fyzického testování a zároveň použitého instrumentálního vybavení.

K tomuto testování byly využity dvě varianty hrotů a dvě varianty rukojetí. První hrot byl zploštělý s poloměrem zakřivení hrotu 30 mm. Tento hrot jde vidět na Obr. 44 v kombinaci bez rukojetě a Obr. 47 s kombinací s rukojetí. V rámci obou variant byly provedeno zkušební měření na referenčním trámci receptury B, která zároveň slouží jako reference pro všechny ostatní receptury a měření.

Při této kalibraci byl snímač umístěn v sestavě měření podélné frekvence f_L . Bylo provedeno několik úderů až do situace, kdy do měřeného signálu začal vstupovat pohyb tělesa na podložce. Tato situace je již za hranicí zkreslení měřeného signálu zkušebního tělesa a typický budící mechanický impuls je podstatně nižší, nicméně cílem kalibrace bylo otestovat použité nástroje v různých podmínkách a tím byla i neúměrná intenzita rázu kladívka.



Obr. 44: Kladívko bez rukojetě s plochým hrotem



Obr. 45: Kladívko bez rukojetě s ostrým hrotem

V průběhu měření byly zaznamenány jak signály snímače, tak signály z budiče-kladívka. Maximální a minimální napětí generované při úderu bylo zaznamenáno a v jednotlivých grafech slouží pro popis intenzity úderu.

Jednotlivé grafy na Obr. 48 až Obr. 51 pak dokumentují odezvu tělesa na buzení signál ve frekvenční oblasti, zpracované pomocí FFT. Tyto grafy dokumentují vlevo podobu signálu odezvy zkušebního tělesa, kde na ose x je čas t a na ose y je měřené napětí snímače U . Na pravém grafu jsou pak znázorněna frekvenční spektra jednotlivých odezev, kde osa x reprezentuje podélnou frekvenci f_L a osa y reprezentuje amplitudu v A v dB.

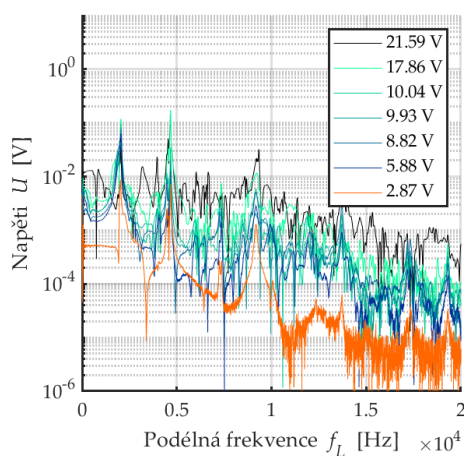
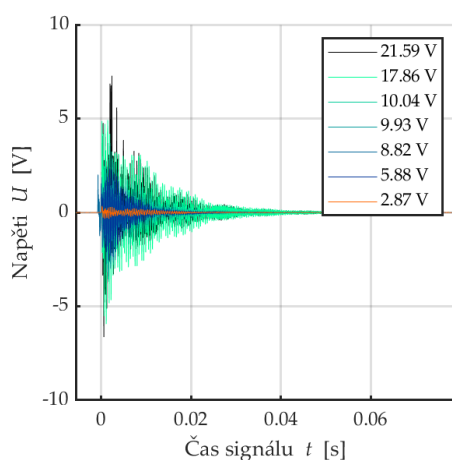


Obr. 46: Kladívko s rukojetí s ostrým hrotem

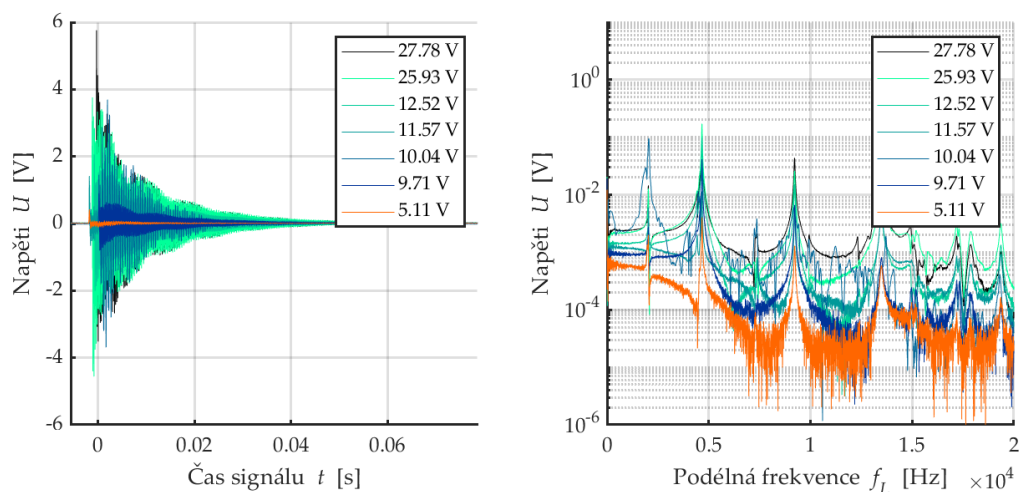


Obr. 47: Kladívko s rukojetí s plochým hrotem

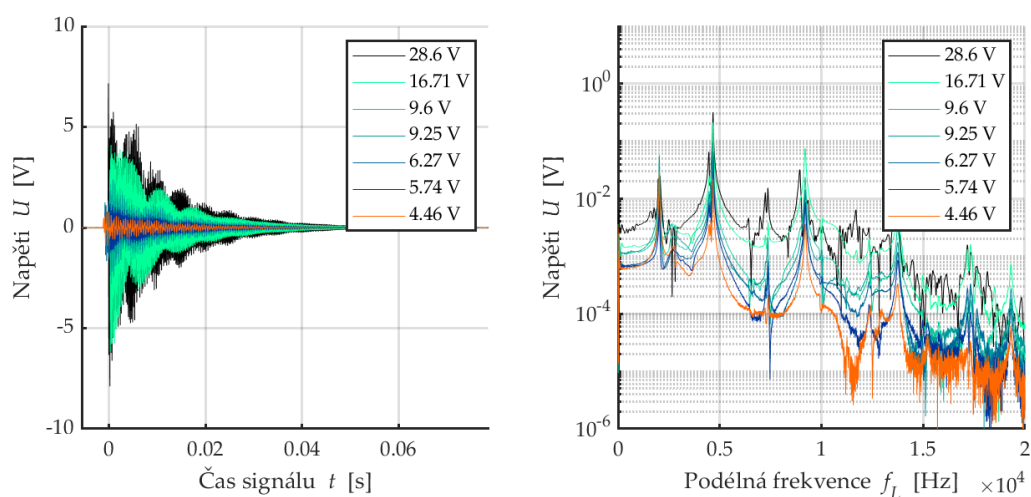
V prvních dvou případech lze vidět zajímavý výsledek při použití ostrého hrotu a při nižších budících energiích. Laboratorně ověřená dominantní rezonanční frekvence kalibračního tělesa byla 4,6 KHz, čemuž odpovídá frekvenční vrchol na této frekvenci. Nicméně dále se ve zkoušeném tělese objevuje vrchol na frekvenci 2,0 KHz. V těchto dvou případech dosahuje amplituda na těchto frekvencích téměř srovnatelných hodnot. Pokud by toto frekvenční spektrum zpracovával automatizovaný software, vyhodnotil by jako první dominantní frekvenci právě frekvenci 2,0 KHz. Kromě těchto parametrů spektra je celkově signál podstatně více zašuměn. V případě měření s kladívkem s ostrým hrotem a s rukojetí je signál zašuměn už při 7 KHz.



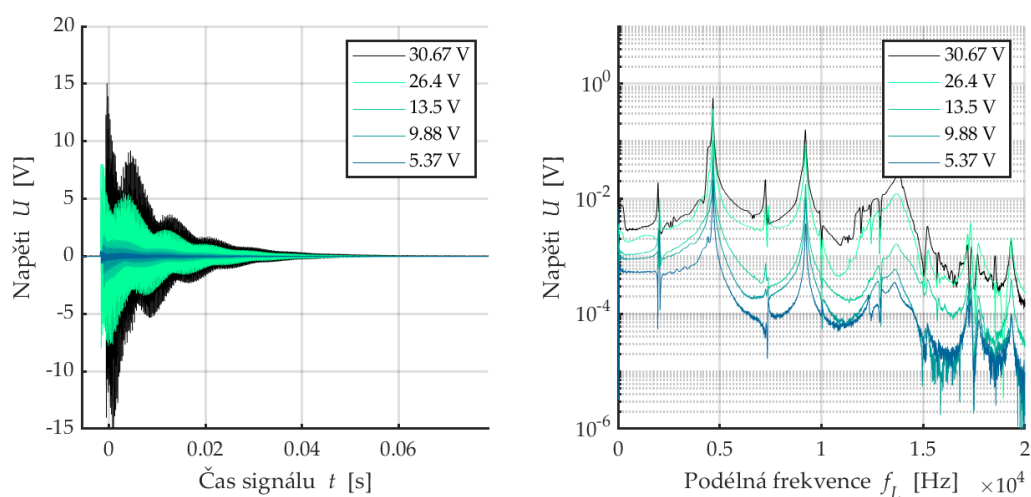
Obr. 48: Příklad úderů kladívkem s ostrým hrotem, bez rukojetě



Obr. 49: Příklad úderů kladívkem s ostrým hrotem, s rukojetí



Obr. 50: Příklad úderů s kladívkem s plochým hrotem, bez rukojetě



Obr. 51: Příklad úderů s kladívkem s plochým hrotem, s rukojetí

4.1.5 Typy testování plošného prvku

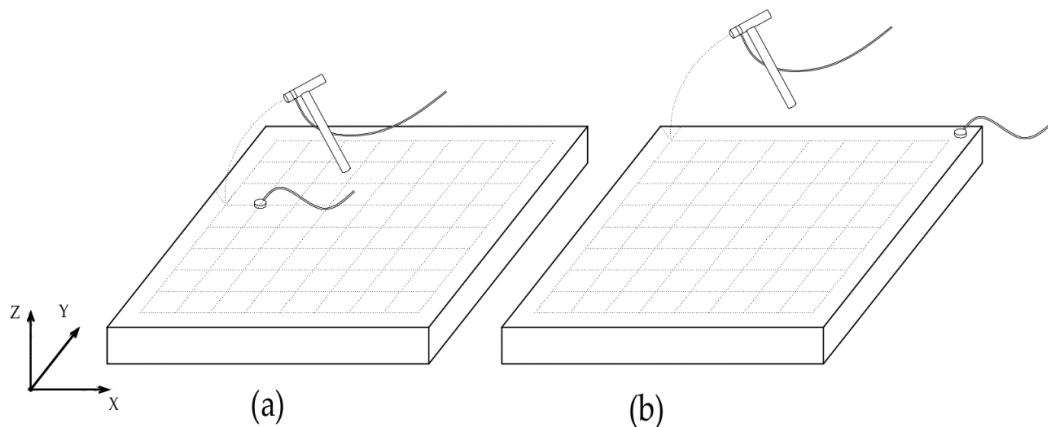
Klasické testování zkušebních těles pro zjištění jejich rezonančních frekvencí v podélném, příčném či kroutivém směru je v podstatě jednoduchá modální analýza, kdy se využívá pouze prvního rezonančního módu kmitání. Zkušební tělesa musí být umístěna na pružnou podložku a snímač a místo úderu jsou předem dané vzhledem k rozměrům a typu zkušebního tělesa a použité normy pro testování.

Modální analýza je podstatně sofistikovanější metoda, která umožňuje posuzovat více frekvenčních módů, útlum na jednotlivých frekvencích a deformační módy dané konstrukce. Díky její robustnosti ji lze použít i na podstatně komplikovanější geometrické struktury. Klasická rezonanční kladívková metoda není příliš vhodná na posuzování složitějších struktur [23] a většinou se volí spíše přístup odebrání zkušebního tělesa, nejčastěji formou jádrového vývrtu, který je poté testován dle předepsané normy.

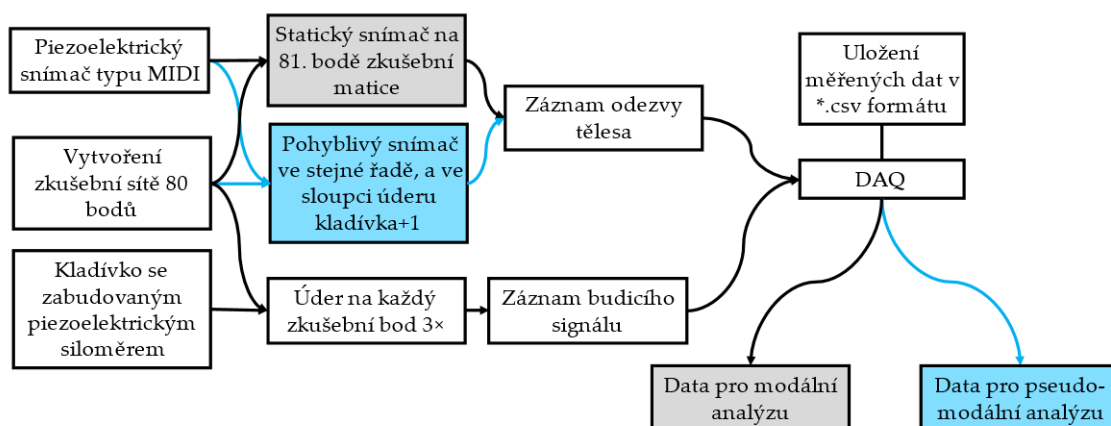
Pomocí modální analýzy tak lze vytvořit geometrický model testované struktury, skládající se z matice zkušebních bodů a poté posuzovat kmitání, útlum a deformaci každého zvoleného bodu zkušební matice ideálně ve všech osách x , y a z . Tento postup je vyjádřen na Obr. 53. Pro účely této práce bylo použito jednoosých piezoelektrických snímačů zrychlení a bude tedy posuzováno kmitání pouze v dominantním směru z . V praxi se častěji využívají tříosé širokopásmové snímače.

Při takovém testování je pozice snímače odezvy tělesa na statickém bodě, který je vyčleněn ze zvolené sítě zkušebních bodů. Pro buzení vlastních frekvencí je použito kladívka s vestavěným silovým snímačem, a každý zkušební bod je buzen celkem třemi po sobě jdoucími údery. Tento postup je znázorněn na Obr. 52 (b). Tímto testováním můžeme reprezentovat zkušební desku jako celek, a lze tak velmi přesně změřit jednotlivé vlastní frekvence, její harmonické složky, útlum a deformační módy.

Vybízí se tedy využít funkci FRF pro posouzení lokální změny materiálových vlastností zkušební desky a zvýšit tak rozlišovací schopnosti standardní metody IE. Tento postup je znázorněn na Obr. 52 (a), kdy se snímač přesouvá přes jednotlivé body zkušební matice a místo buzení je vždy o 1 sloupec doprava čili v kladném směru x . Vzdálenost budiče a snímače je tedy navrhována na 6 cm, a toto umístění odpovídá doporučené sestavě uvedené v normě ASTM C1383-15 [58] použitelné například pro lokalizaci defektů a nehomogenit v CBK.

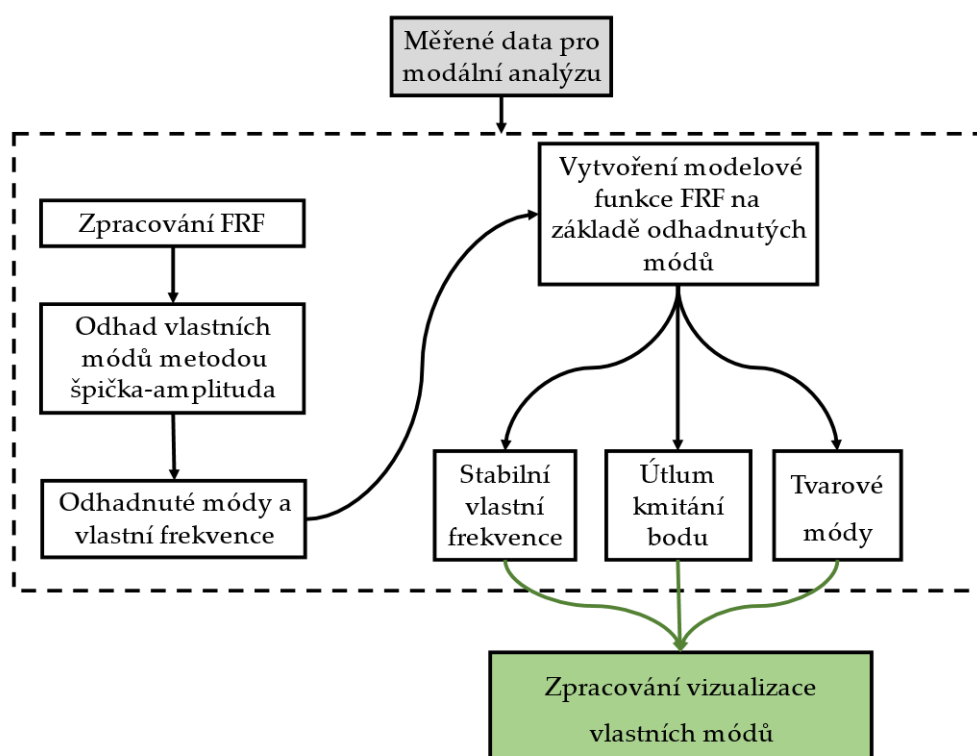


Obr. 52: Schéma zkoušení plošného prvku: a) Testování pomocí metody IE v konkrétních bodech; b) testování pomocí modální analýzy



Obr. 53: Schéma postupu při měření modální analýzy a pseudo-modální analýzy

Cílem tohoto měření je využít při měření odezvy v konkrétním bodu zkušební matice i měřený signál z kladívka a pomocí FRF funkce analyzovat lokální odezvu v každém bodě desky. Tento nástroj nabízí možnost přesněji rozlišovat vlastní frekvence desky od cizích parazitních faktorů. Postup pro měření experimentální modální analýzou je znázorněn na Obr. 54.



Obr. 54: Funkce programu pro zpracování modální analýzy

Schéma na Obr. 55 popisuje postup měření pro pseudo-modální analýzu navrženou v této práci. Tato sestava je v první fázi podobná Obr. 53 s rozdílem v umístění snímače odezvy zkušební tělesa a koncovým vyhodnocením.

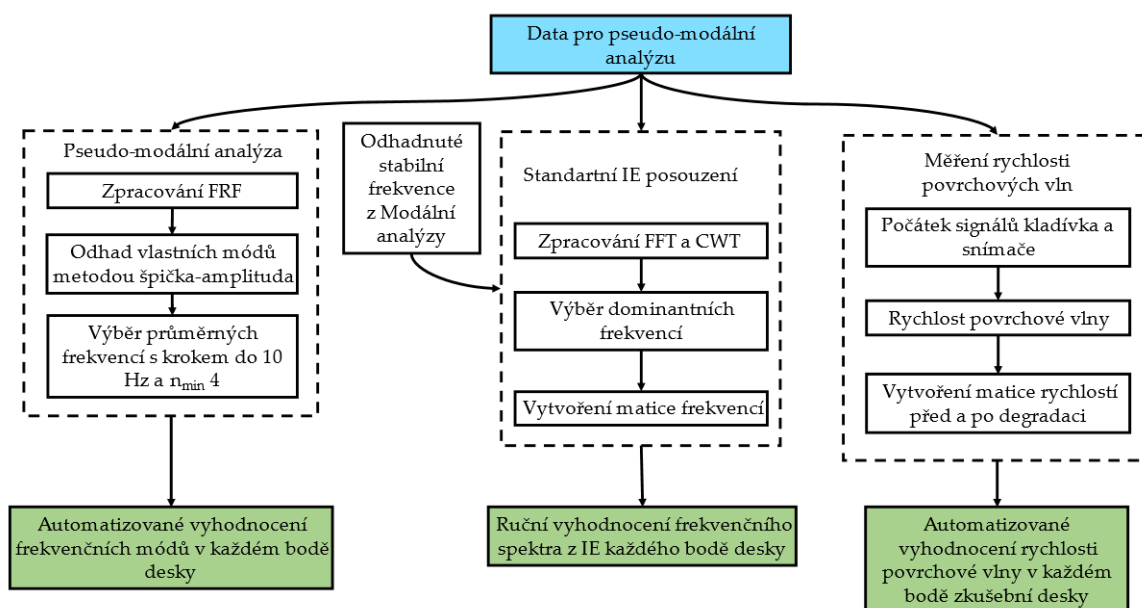
Daný postup měření spočívá ve výběru průměrných stabilních frekvencí v každém měřícím bodě za podmínky, že jednotlivé sousední n hodnoty daného průměru nesmí mít větší rozdíl jak 3 Hz a každá průměrná stabilní frekvence musí být tvořena aspoň 4 hodnotami. Toto nastavení je výsledkem testování a kalibrace celého

vyhodnocovacího skriptu. Jejich podrobnější variací a úpravou by bylo možné docílit vyšší přesnosti či správnosti výsledků, nicméně pro účely této práce je toto nastavení postačující.

Tímto postupem je tedy umožněno odfiltrovat osamocené frekvence, které se nepodílejí na jednotlivých rezonančních módech a pochází od parazitních faktorů. Výsledkem tohoto posouzení je srovnání jednotlivých průměrných frekvencí v každém bodě pomocí 3D grafu, kde v ose x a y je rozměr zkušební sítě bodů desky a v ose z jsou jednotlivé stabilní frekvence.

Tento postup je vhodný pro zvolené posouzení pouze v jedné dominantní ose z . V případě složitějšího geometrického tělesa, nebo při použití víceosého snímače, by byla potřeba využít ještě další rozhodovací algoritmus. Příkladem v této oblasti můžeme uvést článek popisující ověření tuhosti ŽB kontejneru určeného pro uchování vyhořelého radiokativního paliva [103]. Tato publikace popisuje použití modální analýzy na stěnách kontejneru před a po zatížení, a následné srovnávání deformačních módů s MKP (metoda konečných prvků) modelem pro odhad rozložení napětí v konstrukci.

Podobným způsobem lze očekávat i možnost vytvoření modelu pro odhadování reziduálních mechanických vlastností v závislosti na změně rezonanční frekvence způsobené rozličnými degradačními faktory.



Obr. 55: Způsoby zpracování dat měřenými pomocí pseudo-modální analýzy

4.2 Testy na prostém betonu

Vyrobená zkušební tělesa z každé receptury byla rozdělena do několika teplotních sad – na referenční sadu, a pak na jednotlivé zatěžované sady. Z každé sady byla po provedení nedestruktivního zkoušení metodou Impact-Echo a rychlosti průchodu ultrazvuku, vybrána sada zkušebních těles, které byly otestovány destruktivními zkouškami.

Pro účely této práce byly ve spolupráci s prof. Helou navrženy rozličné receptury, které svými parametry mají zaručit dostatečnou různorodost zkušebních těles, a tedy stanovit mezní stavy, které dovolí budoucí interpolaci měřených dat. Navrhnuté receptury lze rozdělit do dvou skupin. Schéma uvedené na Obr. 56 znázorňuje jaké parametry se v jednotlivých recepturách měnily.

		Změna hrubého kameniva [mm]		
		0/4, 8/16	0/4, 8/16, 11/22	0/4, 4/8
Změna pojiva	CEM II/A-S 42,5 N		E	
	CEM I 52,5 R		D	
	CEM I 42,5 R	A	B	C

Obr. 56: Návrh testovaných receptur prostého betonu

První skupina, která zahrnuje receptury A, B a C je zaměřená na vliv použitého hrubého kameniva na výsledky z měření metodou Impact-Echo po teplotním zatěžování. Složení jednotlivých receptur je znázorněné v Tab. 4.

Tab. 4: Navrhnuté receptury první skupiny

Složka:	Hmotnost na 1 m ³ dle jednotlivých receptur [kg]		
	A	B	C
CEM I 42,5 R	345	345	345
Jemné kamenivo Žabčice 0/4 mm	848	813	813
Hrubé kamenivo Olbramovice 4/8 mm	-	-	1010
Hrubé kamenivo Olbramovice 8/16 mm	980	521	-
Hrubé kamenivo Olbramovice 11/22 mm	-	391	-
Přířada SikaViscocrete 2030	2,8	2,5	3,1
Voda	160	176	176

Druhá skupina zahrnuje receptury D a E, které se zaměřují na vliv různého druhu cementu na výsledky z měření metodou Impact-Echo po teplotním zatěžování. Složení jednotlivých receptur viz Tab. 5.

Tab. 5: Navrhnuté receptury druhé skupiny

Složka:	Hmotnost na 1 m ³ dle jednotlivých receptur [kg]		
	B	D	E
CEM I 42,5 R	345	-	-
CEM II/A-S 42,5 N	-	345	-
CEM I 52,5 R	-	-	345
Jemné kamenivo Žabčice 0/4 mm	813	934	934
Hrubé kamenivo Olbramovice 8/16 mm	521	521	521
Hrubé kamenivo Olbramovice 11/22 mm	391	355	391
Pří sada SikaViscocrete 2030	2,5	3,1	3,1
Voda	176	155	162

Tyto receptury byly navrženy v rámci projektu GAČR No.1602261S. Záměrem bylo navrhnout receptury, které se mezi sebou budou lišit kvalitou a výslednými materiálovými vlastnostmi. Zatímco vliv kompozice kameniva upravuje výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti jako jsou pevnosti a objemová hmotnost, typ použitého pojiva ovlivňuje převážně reakci kompozitu na vysoké teploty.

4.2.1 Příprava zkušebních těles

Pro první etapu zkoušení byl zvolen zkušební trámec 100 x 100 x 400 mm. Zkušební tělesa byla den od výroby uložena ve vodním prostředí, a to po dobu 28 dní. Po této době byla vytažena na vzduch a ponechána týden na vyschnutí na vzduchu. Poté byla všechna tělesa zvážena a vysušena na 105 °C po dobu 72 hodin v sušící peci (Obr. 58). Tímto krokem byla odstraněna většina fyzikálně volné a vázané vody, čímž se předešlo nárůstu tlaku vodní páry během výpalu v pórech, a snížilo se tím riziko, že během výpalu nastane explozivní odprýskávání.



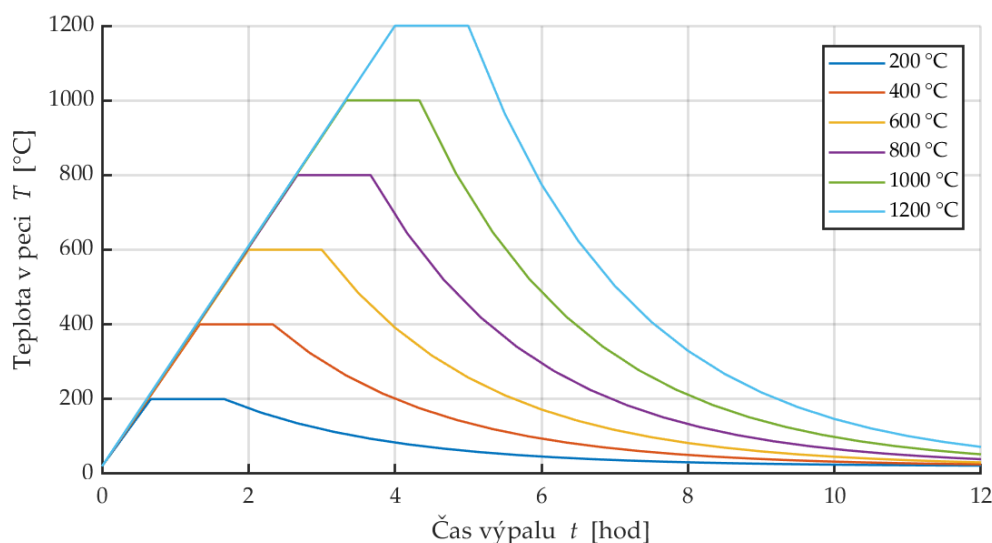
Obr. 57: Keramická pec Rhode KE 130B



Obr. 58: Laboratorní sušící pec

Zkušební tělesa byla rozdělena do několika sad podle teplotního zatěžování. První skupina byla referenční, nebyla tedy nijak tepelně namáhána. Dále byly sady rozděleny podle teploty výpalu na 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C a 1200 °C. Výpal probíhal v keramické peci Rhode KE 130B (Obr. 57), rychlost nárůstu teploty byla nastavena na 5 °C/min. Na cílové teplotě byla zkušební tělesa ponechána po dobu 60 minut, a dále byla samovolně chlazena v peci. Kvůli manipulaci se vzorky musela jejich teplota klesnout pod 80 °C. Tento teplotní průběh je znázorněn na ilustrativním Obr. 59.

Po zchlazení zkušebních těles v peci vlivem teploty atmosférického vzduchu byla tělesa zvážena a byl zaznamenán hmotnostní úbytek. Následně byla tělesa přemístěna do laboratoře, kde započalo samotné měření pomocí jednotlivých nedestruktivních metod. Měření na trámci probíhalo za laboratorní teploty 21 ± 1 °C.



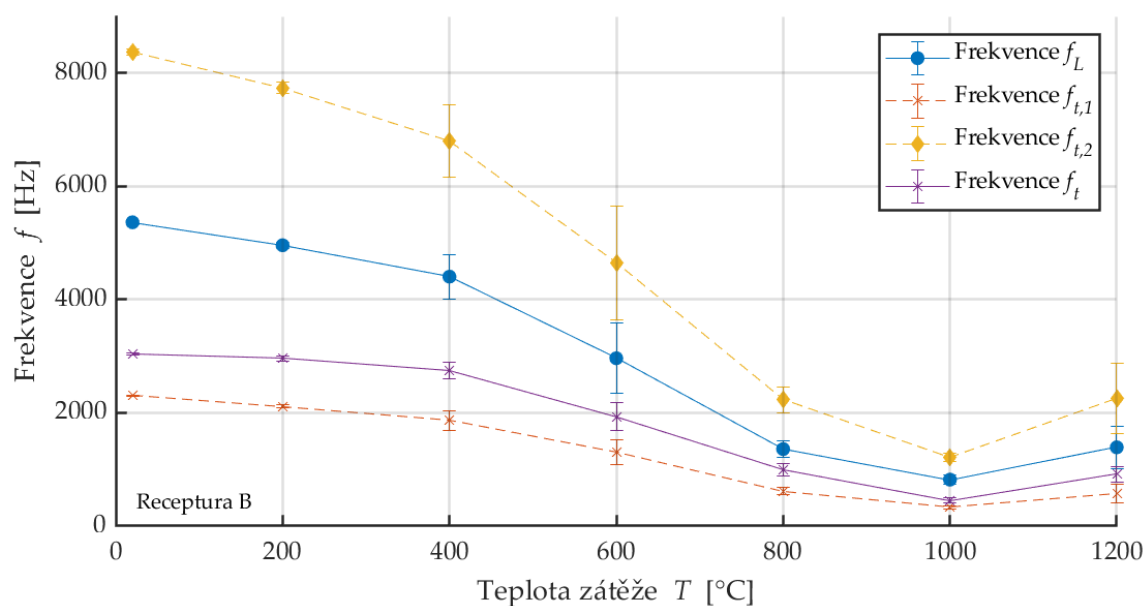
Obr. 59: Ilustrativní znázornění všech fází výpalu v peci

4.2.2 Testování pomocí vybraných metod

Z každé zkušební sady byla vyčleněna zkušební tělesa pro testování jednotlivými zvolenými metodami. Většina zkušebních metod je sice z oblasti NDT, nicméně pro jejich účel bylo potřeba zkušební tělesa nenávratně upravit, například zářezem do 1/3 hloubky, či nařezáním na tenké plátky. Proto byly s tělesy nejprve provedeny testy, pro které nebylo potřeba zkušební trámce nijak upravovat, poté bylo přistoupeno k více invazivním metodám testování.

4.2.2.1 Výsledky metody IE

Při degradaci zkušebních trámců vysokou teplotou dochází k fyzikálně mechanickým a fyzikálně chemickým fázovým změnám, které vedou ke změnám mechanických vlastností zkušebních těles. V průběhu dehydratace cementového tmele dochází ke smršťování jeho objemu, vzniku prasklinek a ztrátě spojitosti. Tyto necelistvosti (nové defekty a praskliny) se pro mechanické vlnění jeví jako překážky, které vedou při kontaktu s mechanickým vlněním k vzniku šumu. Pro velmi degradovaná zkušební tělesa, (800–1000 °C) byly některé vzorky vyřazeny, protože zaznamenaný signál byl „přehlušen“ šumem.



Obr. 60: Srovnání jednotlivých průměrných dominantních frekvencí teplotních sad receptury B

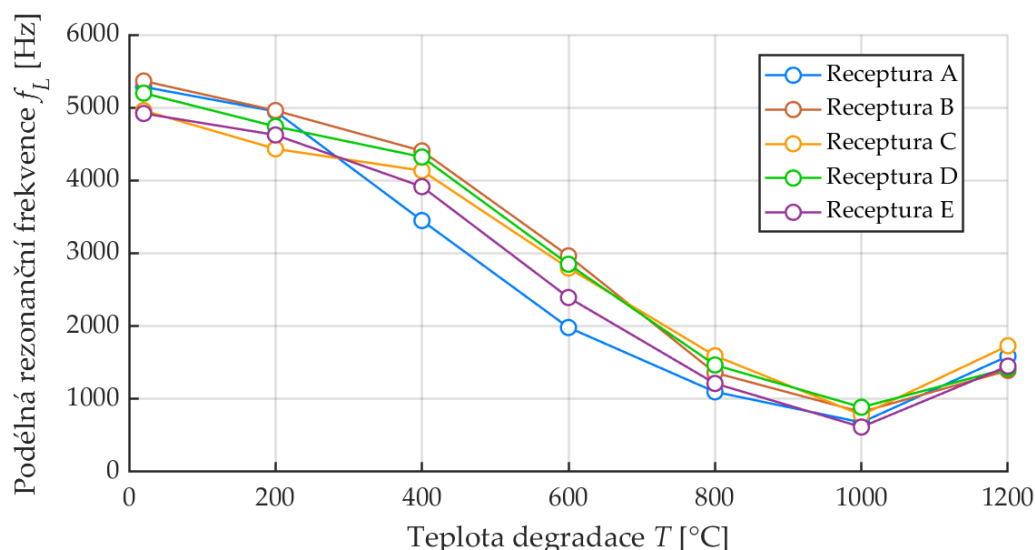
Srovnání dominantních frekvencí f_L podélného vlnění zkušebních trámců jednotlivých receptur je znázorněno na Obr. 60⁵. Je vidět, že výsledky z referenčních sad (20 °C) jsou rozdílné pro jednotlivé směsi. První významný posun dominantní frekvence u receptury A přichází na teplotě 400 °C, zatímco u receptury B a C až při 600 °C.⁶

Nastalý pokles ve změřené frekvenci můžeme vzhledem k rychlosti nástupu teploty 5 °C/min přisoudit příliš rychlému vysušování, a tudíž výraznějšímu poškození struktury zkušebních těles. Teplotní sady 400-800 °C vykazují nejvyšší rozptyl měřených hodnot a chyba měření zde dosahuje hodnot $\pm 1,8$ KHz.

Podobný vývoj je i u všech ostatních testovaných receptur, jak dokládá Obr. 61. Charakter frekvenčních poměrů mezi rezonanční frekvencí podélného, ohybového a kroutivého kmitání zůstává pro jednotlivé sady stejný či podobný.

⁵ Další detailní srovnání měřených frekvencí ostatních receptur jsou uvedené v příloze v kapitole 11.1 Rezonanční frekvence testovaných receptur.

⁶ Při výpalu prvních dvou teplotních sad receptury A nedošlo k předsušení trámců.



Obr. 61: Průměrná rezonanční frekvence podélného kmitání jednotlivých receptur a teplotních sad

Míra snížení rezonančních frekvencí se při 800 °C snížila a při teplotě 1000 °C došlo k ponížení jednotlivých frekvencí pouze o 8 %, nicméně z pohledu pevností se jedná o fyzikálně-mechanické minimum. Při teplotní degradaci teplotou 1200 °C dochází naopak k navýšení rezonanční frekvence o 19 %, trámce jsou opět celistvé a nedochází k odlamování jemného kameniva s pojivou matricí, jako tomu dochází při teplotní sadě degradované při 1000 °C. Dochází zde k částečnému slinování a zpětnému zpevnění struktury.

4.2.2.2 Frekvenční poměry

Jednou ze součástí vyhodnocení rezonanční metody je srovnání měřených frekvencí a jejich poměrů. Jedná se o poměr frekvence kroutivého kmitání, frekvence příčného kmitání a frekvence podélného kmitání. Norma uvádí příklad na ideální krychli z homogenního a izotropního materiálu. Prezentované měření bylo provedeno na betonu degradovaném různými teplotami, a jedná se tedy o heterogenní materiál, jehož heterogenita se postupem tepelné degradace zvyšuje. Proto se vybízí srovnání frekvenčních poměrů i v tomto případě. Výsledky těchto poměrů jsou uvedené v Tab. 6.

Tab. 6: Frekvenční poměry měřených frekvencí f_L , $f_{t,1}$ a f_t jednotlivých receptur při různé teplotní degradaci

Teplota T [°C]	A		B		C		D		E	
	$f_L:f_{t,1}$	$f_L:f_t$	$f_L:f_{t,1}$	$f_L:f_t$	$f_L:f_{t,1}$	$f_L:f_t$	$f_L:f_{t,1}$	$f_L:f_t$	$f_L:f_{t,1}$	$f_L:f_t$
20	0,422	0,572	0,429	0,567	0,428	0,595	0,422	0,578	0,431	0,592
200	0,417	0,579	0,426	0,598	0,432	0,598	0,446	0,592	0,425	0,590
400	0,416	0,715	0,423	0,622	0,429	0,553	0,433	0,583	0,422	0,611
600	0,464	0,739	0,442	0,652	0,426	0,511	0,402	0,611	0,511	0,578
800	0,423	0,688	0,412	0,661	0,392	0,529	0,413	0,686	0,425	0,691
1000	0,416	0,811	0,515	0,749	0,457	0,692	0,411	0,680	0,581	0,985
1200	0,404	0,681	0,478	0,727	0,535	0,622	0,459	0,666	0,441	0,678

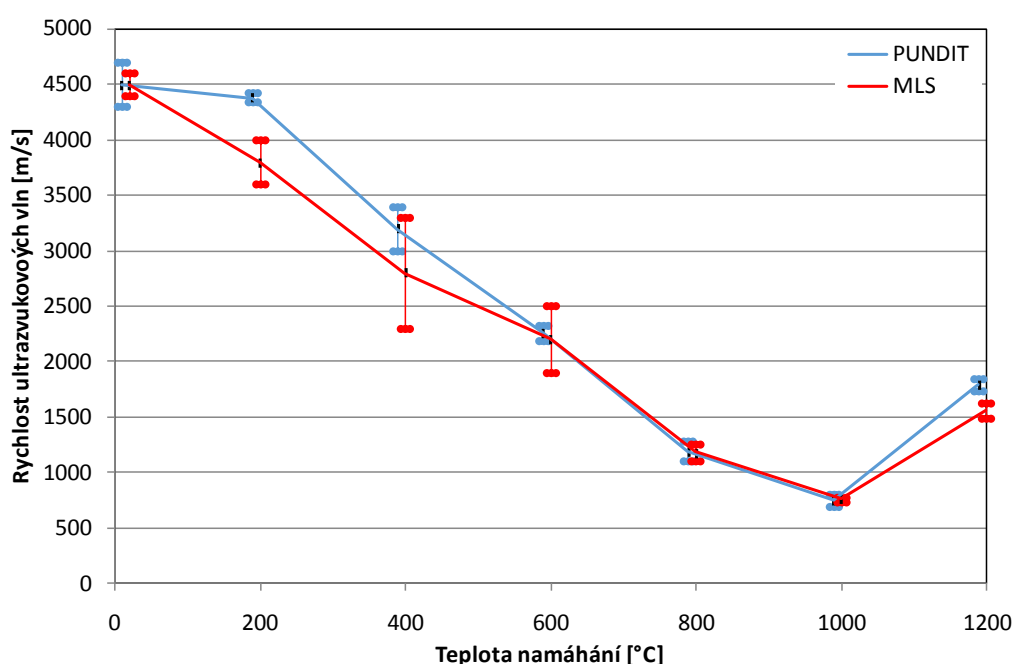
Dílčí poměry všech měřených receptur se v referenčním stavu pohybují v rozmezí hodnot 0,422-0,431 pro poměr $f_L:f_{i,1}$ a rozmezí hodnot 0,567-0,592 pro poměr $f_L:f_i$. Lze tedy říct, že bez rozdílu receptur jednotlivé poměry jsou téměř totožné. Pro jednotlivé teplotně degradované sady pak dochází ke kolísání hodnot, kdy minimum nastává pro první poměr $f_L:f_{i,1}$ u receptury C při degradaci teplotou 800 °C, maximum u receptury E při degradaci teplotou 1000 °C.

Minimum druhého poměru frekvencí $f_L:f_i$ nastává u receptury C při degradaci teplotou 600 °C a maximum nastává u receptury E při degradaci teplotou 1000 °C. Tyto mezní hodnoty nastávají především ve vyšších teplotách, a to platí jak pro minimální tak maximální hodnoty poměrů. Nelze tedy říct, že by zde byla výrazná souvislost s mírou degradace a tento typ posouzení je tedy vypovídající opravdu pouze v případě referenčního měření teplotně nedegradovaných zkušebních těles.

4.2.2.3 Výsledky měření pomocí MLS

Pro účely této práce byly též zahrnuty výstupy z měření pomocí buzení pseudonáhodného signálu typu MLS. Jedná se o integraci několika zkušebních metod v jednu měřicí aparaturu, která byla vyvinuta v rámci disertační práce [78].

Metoda vyvinutá v této práci vykazovala velmi dobrou shodu s rezonančními metodami typu IE, avšak její výsledky měření rychlosti průchodu ultrazvuku zkušebními tělesy vykazovaly značnou odchylku od přístroje PUNDIT, který byl použit pro UZ měření. Příklad tohoto měření je uvedeno na Obr. 62.

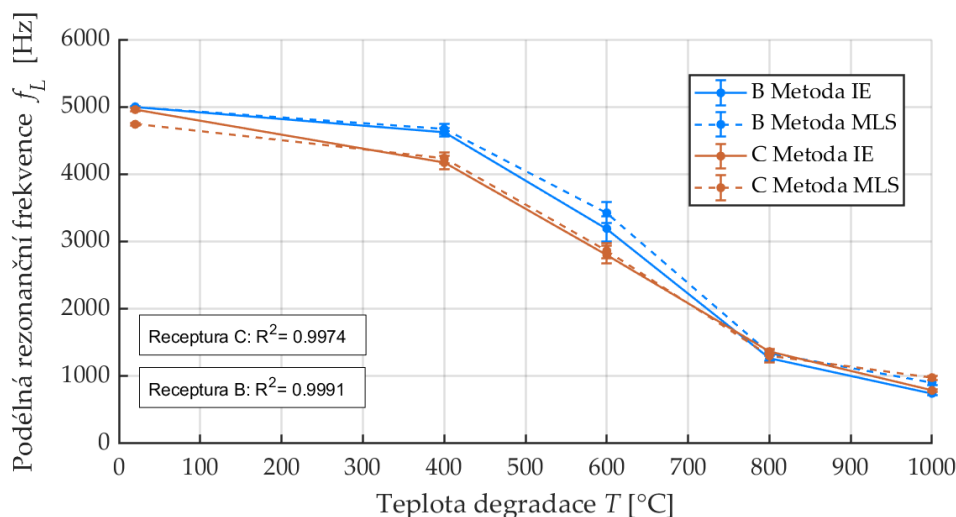


Obr. 62: Rychlost UZ vln měřena impulzní metodou (přístroj PUNDIT) a navrženou měřicí aparaturou u receptury B [78]

Uvedený graf popisuje rozdíl mezi měřením rychlosti průchodu ultrazvuku pomocí MLS a pomocí konvenčního přístroje PUNDIT. Z měřených výsledků jde vidět, že v rozmezí teplot 200-400 °C metoda MLS podává zcela odlišnou průměrnou hodnotu a vykazuje i podstatně vyšší rozptyl rychlosti ultrazvuku. Měření u ostatních teplotních sad vykazuje srovnatelné výsledky jako přístroj PUNDIT.

Měření první dominantní rezonanční frekvence podélného kmitání f_L metod IE a MLS je znázorněno na Obr. 63. Pro toto srovnání byly vybrány receptury B a C, protože vykazují nejvyšší rozptyl měřených hodnot a v rámci odolnosti vůči vysokým teplotám, vykazovala receptura B nejvyšší odolnost a receptura C nejnižší odolnost.

Z pohledu na měřené hodnoty je na první pohled zřejmé, že se měřený trend frekvence u obou metod téměř kopíruje a jejich koeficient korelace R^2 dosahuje téměř hodnoty 1. Tyto výsledky tedy poukazují na velmi dobrou shodu mezi metodou IE a MLS v oblasti měření rezonanční frekvence.



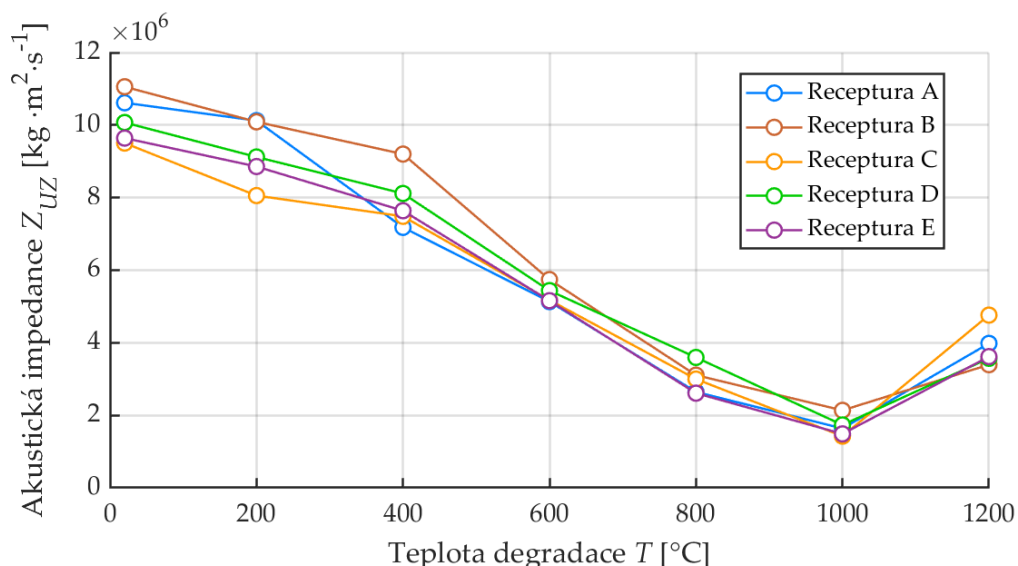
Obr. 63: Srovnání měření podélné rezonanční frekvence f_L metodou IE a MLS

4.2.2.4 Akustická impedance

Z pohledu rychlého a snadného posouzení zkušebních těles degradovaných vysokou teplotou se vybízí posuzovat materiál z pohledu akustické impedance Z , která popisuje prostupnost daného prostředí pro mechanické vlnění a chování mechanické vlny při přestupu z jednoho prostředí do jiného (beton-vzduch, beton-ocel apod.).

Jedná se o prostý součin objemové hmotnosti daného materiálu a rychlosti šíření mechanické vlny, a nemá tedy žádný exponenciální člen, tak jako tomu je u dynamického modulu pružnosti, kde má rychlost mechanické vlny exponent rovný 2. Tento parametr vychází z odvození vztahu mezi dynamickým modulem pružnosti a statickým modulem pružnosti běžně používaných pevnostních tříd betonu.

Akustická impedance je naproti tomu materiálová vlastnost, která je užitečná při posuzování prostupnosti daného materiálu pro mechanické vlnění. Pro vyjádření akustické impedance v této práci byla použita rychlost ultrazvukového signálu v podélném směru a pro každou teplotní sadu všech receptur byly zpracovány průměrné hodnoty Z_{uz} , které jsou uvedené na Obr. 64.



Obr. 64: Průměrná akustická impedance testovaných receptur a dílčích teplotních sad

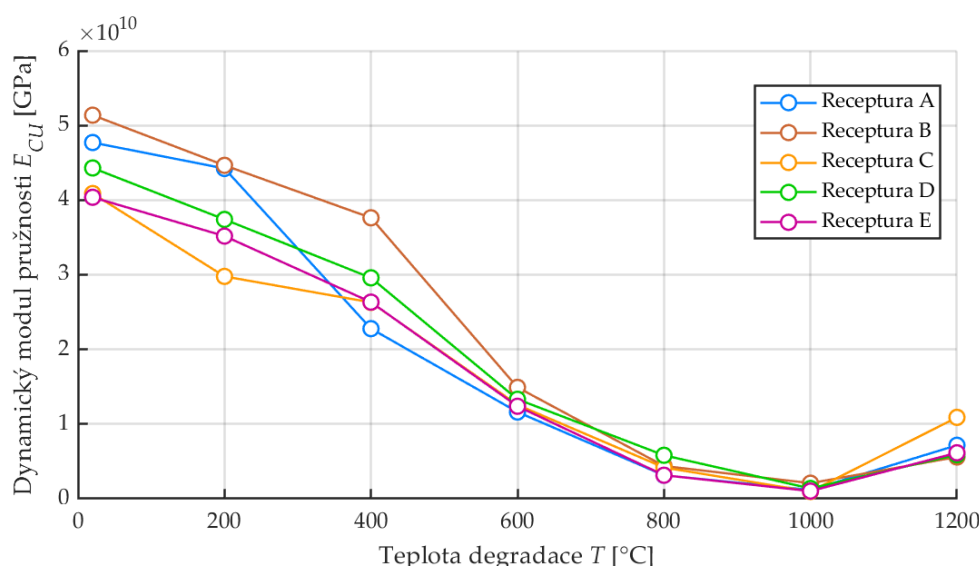
Jednotlivé hodnoty vykazují podobný trend jako výsledky měřené rezonanční frekvence nebo dynamického modulu pružnosti, tzn. postupný pokles měřené veličiny k teplotě 1000 °C a na teplotu 1200 °C opětovné navýšení hodnot akustické impedance.

4.2.2.5 Výsledky UZ měření

Rychlost průchodu ultrazvuku byla na zkušebních tělesech měřena v podélném směru zkoušení. Trámec byl posazen na pružnou polyuretanovou podložku ve směru hutnění a byl měřen v třech pozicích, a to při vrchní hraně, uprostřed a při spodní hraně [104]. Toto měření je založeno na zjištění nejkratší doby, za kterou dokáže ultrazvukový signál urazit danou vzdálenost ve zkoušené hmotě. Vzhledem k postupnému hutnění zkoušených těles, není rychlost průchodu ve všech „hladinách“ stejná. Hledá se nejkratší doba průchodu. Ze zjištěných časů průchodu UZ vlnění byl následně určen dynamický modul pružnosti, jehož výsledky jsou v podobě grafu uvedeny na Obr. 65.

Při měření rychlosti průchodu ultrazvuku zkušebními trávci byla jako vazebný prostředek použita modelářská plastelína, která svými vlastnostmi neovlivní signál a nedochází k její absorpci a vysušování do zkušebního tělesa. Porézní charakter referenčních těles, a hlavně pak zvýšená porozita teplotně degradovaných zkušebních těles, způsobuje rychlé vsakování běžně používaných gelů a tím se mírně mění i rychlost průchodu ultrazvuku.

Kalibrace signálu byla provedena na měřeném etalonu o známém času průchodu UZ signálu 56,4 μ s, zároveň byla u každého měření měřena ztráta na vrstvě plastelíny jako vazebního prostředku, která byla odečtena od měřeného času.



Obr. 65: Dynamický modul z měření rychlosti průchodu ultrazvuku na zkušebních trámcích všech receptur pro jednotlivé teplotní sady

Trend v dynamickém modulu pružnosti je mírně odlišný od rezonanční frekvence. Dynamický modul pružnosti se v referenčním stavu pohybuje mezi hodnotami 40-52 GPa a jednotlivé receptury tedy vykazují velký rozptyl a jsou mezi sebou jasně rozeznatelné. Tento charakter rozložení měřených hodnot si receptury ponechávají i při 200 a 400 °C, kdy stále mezi sebou lze poměrně dobře receptury rozlišit.

Po překročení teploty 600 °C dochází ke shlukování průměrných hodnot dynamického modulu pružnosti a jednotlivá rozlišitelnost receptur klesá. Podobně tomu je i u 800, 1000 a 1200 °C s výjimkou receptury C, která při 1200 °C vykazuje vyšší míru zpevnění při částečném slinování.

4.2.2.6 Poměr rychlostí k frekvencím

Pokud známe rezonanční frekvenci podélného kmitání, rychlost průchodu ultrazvuku v podélném směru a objemovou hmotnost zkušebního tělesa, vybízí se možnost ověřit platnost vzorce pro přepočítání mezi frekvencí zkušebního tělesa a rychlostí podélné P vlny [58]:

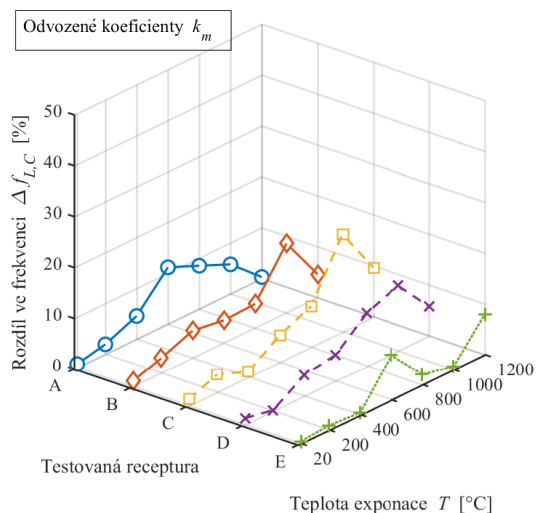
$$f = \frac{C_p \cdot k_c}{L \cdot 2} \quad (10)$$

Při znalosti aspoň dvou proměnných, můžeme zbývající neznámou vyjádřit pomocí tohoto přepočtu (10). Lze tak například vyjádřit objemovou hmotnost betonového tránce ze znalosti jeho rezonanční frekvence v podélném směru a rychlosti mechanické vlny. Tento výpočet je též základem pro určování hloubky rozličných defektů, na kterém stojí metoda IE dle ASTM C1383-15 [58].

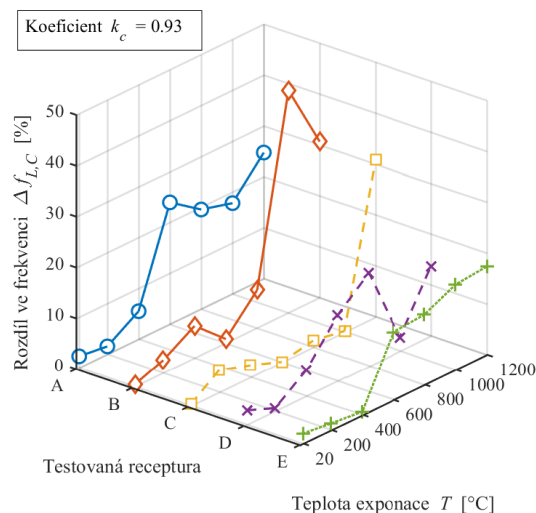
V tomto porovnání využijeme tohoto vzorce pro výpočet rezonanční frekvence na základě znalosti objemové hmotnosti a rychlosti mechanické vlny měřené pomocí ultrazvuku přístrojem PULSONIC. V uvedeném přepočtení vztahu je dále koeficient k_c , který je běžně dle literatury roven hodnotám 0,93-0,98 a zohledňuje heterogenitu betonu.

Toto srovnání je uvedené na Obr. 66 a Obr. 67 a je zde vyjádřen rozdíl mezi skutečně měřenou rezonanční frekvencí a spočtenou frekvencí pomocí uvedeného vzorce.

Rozdíl mezi měřenou a spočtenou vlastní frekvencí vyjádřený v relativním měřítku dosahuje u referenčních zkušebních těles hodnoty do 5 % a lze jej opravdu dobře použít pro tento přepočet. Se zvyšující teplotou však tento rozdíl nabývá postupně vyšších hodnot. Nejvíce dosahuje u receptury B při teplotě degradace 1000 °C hodnotu 46 %. Podobně je tomu u ostatních receptur při vyšších teplotách degradace.



Obr. 66: Srovnání rozdílu frekvence s odvozeným koeficientem heterogenity



Obr. 67: Srovnání rozdílu frekvence s klasickým koeficientem heterogenity

Vybízí se tedy najít takové koeficienty, které by tento rozdíl snížily a staly se tak indikátory přítomnosti poškození. Graf s odhadnutými koeficienty k_m je uveden na Obr. 66. Tento odhad byl docílen evolučním algoritmem [105], který je součástí nástrojů modulu řešitel v MS Excel. Zde byl jako kontrolní parametr zvolen právě minimální rozdíl mezi spočtenou a měřenou frekvencí. S novými odvozenými koeficienty lze vidět, že rozdíl mezi spočtenou a skutečně změřenou frekvencí je nižší a více rovnoměrně rozložen mezi jednotlivými teplotními sadami. Jednotlivé odvozené koeficienty jsou uvedené v Tab. 7.

Tab. 7: Odvozené koeficienty k_m

Teplota T [°C]	20	200	400	600	800	1000	1200
k_m [-]	0,934	0,923	0,888	0,865	0,781	0,790	0,717
δk_m [-]	±0,003	±0,007	±0,008	±0,010	±0,020	±0,030	±0,020

Z této tabulky jde vidět sestupný trend v koeficientu k_m , což je poměrně výhodné, protože je snížena šance záměny zkušebních těles degradovaných na 800 a 1200 °C. Měřené hodnoty jak rezonanční frekvence, rychlosti průchodu ultrazvuku či pevnosti v tahu se u těchto teplotních sad všech receptur překrývají. Při testování takto degradovaného vzorku, bez znalosti degradační teploty, může dojít k mylné interpretaci. Výpočet právě tohoto koeficientu by mohl teoreticky fungovat jako kontrolní podmínka, zda nehrozí tato záměna při interpretaci.

4.2.2.7 Akustická emise v tříbodovém ohybu

Pro měření metodou akustické emise byla vybrána zkušební tělesa z jednotlivých teplotních sad 20, 400, 600, 800, 1000 a 1200 °C receptur A, B a C. Po tepelné degradaci

jednotlivými teplotami byl u každého zkušebního tělesa proveden centrální zářez do 1/3 výšky zkušebního tělesa diamantovým kotoučem. Pro záznam signálu akustické emise byl použit systém XEDO od firmy DAKEL. Signály akustické emise byly zachyceny pomocí čtyř piezoelektrických snímačů (IDK-09) a signál byl zesílen pomocí 35 dB předzesilovače. Snímače byly rozmístěny podle Obr. 68. Výsledky těchto měření byly mimo jiné publikovány L. Topolářem a kolektivem [106].



Obr. 68: Rozmístění snímačů akustické emise během tříbodového ohybového testu

Pro popis signálů akustické emise, které vznikají ve zkušebních tělesech během tříbodového ohybového testu, byla vyhodnocena délka trvání a energie signálů akustické emise. Délka trvání akustické emise signálů je určena rozdílem časů mezi prvním a posledním překročením nastavené prahové hodnoty. Tento parametr lze též interpretovat jako míra degradace zkušebních těles. V případě referenčních nepoškozených zkušebních těles (s označením 20 °C) jsou tyto délky signálů nejdelší (viz Tab. 8). Při testování zkušebních těles, které byla teplotně degradována, se délka signálů akustické emise zkracuje. Což je způsobeno narušením cementových vazeb a poté i jejich rozpadem, změnou krystalické fáze křemene a rozpadem portlanditu. Naproti tomu při vytvoření keramické vazby (výpal na 1200 °C) se opět délka signálů zvětší, což je způsobeno částečným slinutím vzorků. Energie signálů akustické emise je definována jako velikost plochy pod obálkou akusticko-emisní události. Vyšší hodnota energie akustické emise znamená lepší vazbu ve vnitřní struktuře materiálu.

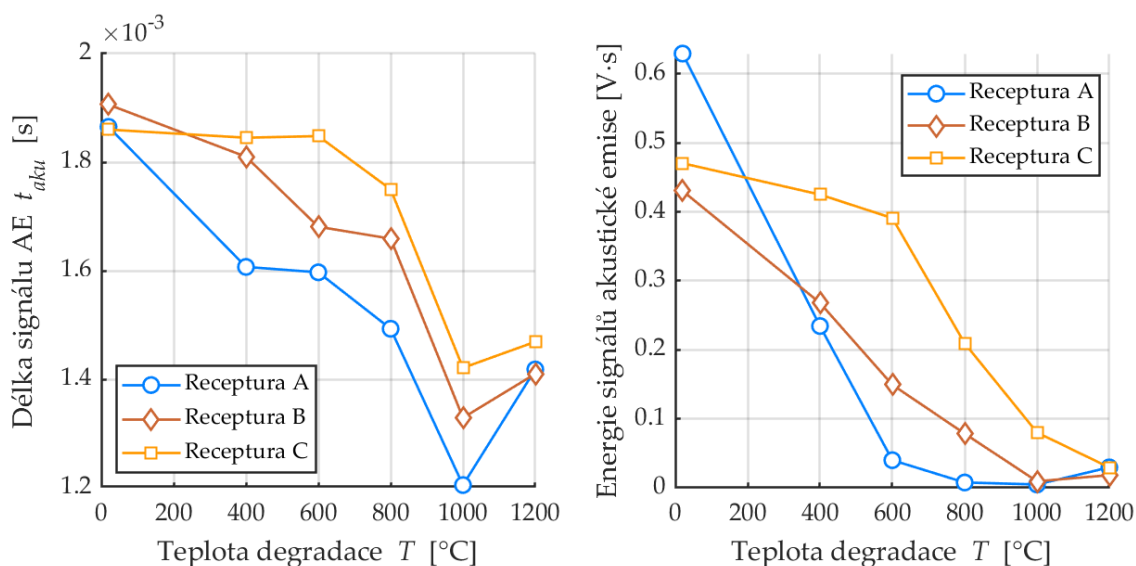
Ze získaných hodnot je vidět, že nejlepší vazbu vnitřní struktury vykazuje receptura C, která u všech teplot výpalu má nejvyšší hodnoty. Tato skutečnost může ukazovat na relativně nejmenší vnitřní poškození vlivem zvyšujících se teplot, což je v korelaci se získanými hodnotami pevnosti v tahu za ohybu.

Tab. 8: Absolutní naměřené hodnoty parametrů signálu akustické emise
(získané ze tří nezávislých měření)

Teplota degradace T [°C]	Receptura	Délka signálu AE t_{AE} [μs]	Energie signálů akustické emise [V·s] 10 ⁻⁵
20	A	1865	6293
	B	1906	4303
	C	1860	4704
400	A	1607	2344
	B	1810	2679
	C	1845	4250
600	A	1597	400
	B	1681	1493
	C	1848	3909
800	A	1493	77
	B	1659	785
	C	1750	2094
1000	A	1205	48
	B	1329	94
	C	1421	802
1200	A	1418	296
	B	1410	183
	C	1469	294

Absolutní naměřené hodnoty uvedené v Tab. 8 nám ukazují srovnání mezi jednotlivými recepturami. Ale nevypovídají tolik o vlivu a míře poškození těchto zkušebních těles, protože každá receptura má jiné výchozí hodnoty parametrů akustické emise pro referenční zkušební tělesa (označené 20). Z následných poklesů těchto hodnot lze snadněji určit odolnost směsi proti vysokým teplotám. Z hlediska relativní délky signálů a energie akustické emise vychází s nejlepší odolností a nejmenším porušením vnitřních vazeb receptura C.

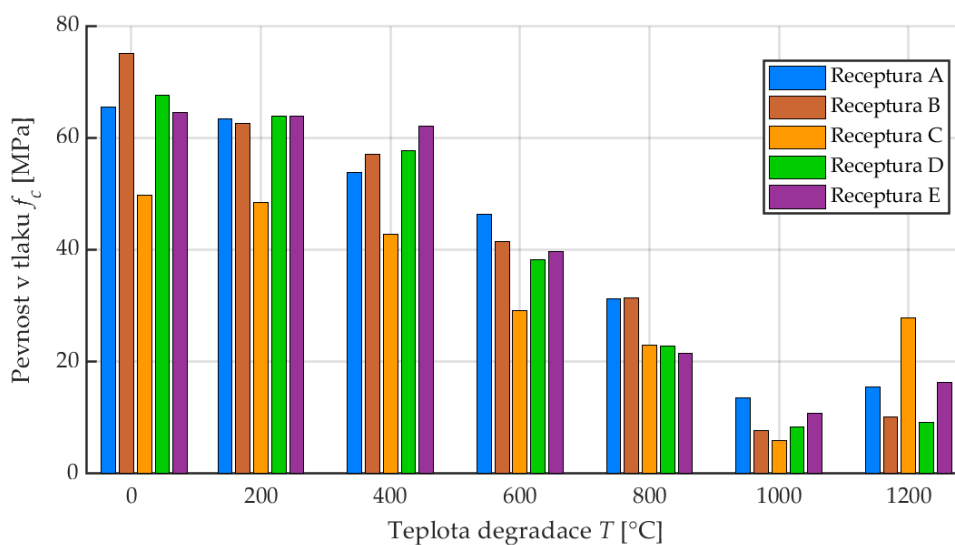
Výše uvedená skutečnost je zřejmě zapříčiněna použitím zejména jemných frakcí kameniva, které zřejmě lépe zachytí rozpady Portlanditu. Naopak nejhůře vychází receptura A. Nejhorší výsledky u receptury A se dají zdůvodnit vynechanou frakcí kameniva 4/8. Také je z grafů na Obr. 69 patrné, že po slinutí a vytvoření keramické vazby (1200 °C) dosahují všechny receptury relativně podobných hodnot (vzhledem k výchozím hodnotám).



Obr. 69: Měření akustickou emisí vyhodnocené formou délky signálu (vlevo) a energie signálu (vpravo)

4.2.2.8 Výsledky destruktivních zkoušek

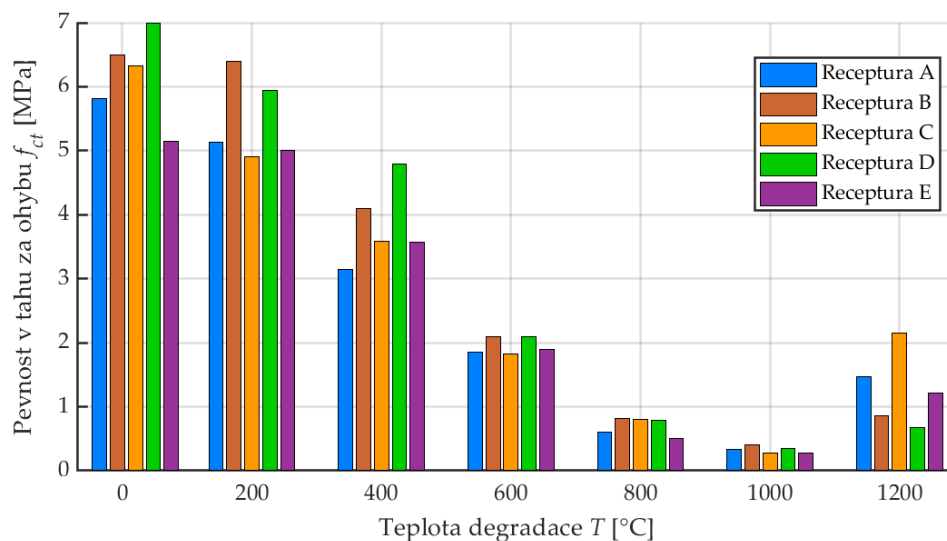
Z vyrobených sad jednotlivých receptur byla vybrána 3 zkušební tělesa, která byla podrobena zkoušce pevnosti v tahu v čtyř bodovém ohybu, a na zlomených koncích byla provedena zkouška pevnosti v krychelném tlaku. Výsledky ze zkoušek pevností v tlaku jsou uvedeny na Obr. 70 a výsledky ze zkoušek pevností v tahu čtyřbodovým ohybem jsou uvedeny na Obr. 71. Na referenční sadě můžeme zpozorovat pevnostní rozdíl mezi zvolenými recepturami A, B a C.



Obr. 70: Pevnost v tlaku jednotlivých receptur

Nejvyšších hodnot pevností v tlaku 76 MPa dosahuje referenční sada receptury B s použitým hrubým kamenivem frakce 11/22 mm a 8/16 mm z kamenolomu Olbramovice. Nejnižších referenčních pevností 50 MPa dosahuje sada receptury C s použitým hrubým kamenivem 4/8 mm Olbramovice. Při porovnání hodnot pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem, dochází k výraznějšímu poklesu pevnosti v tahu ohybem, kde je pokles pevnosti v tahu daleko strmější. Pevnost v tahu pro všechny tři zkoušené receptury plynule klesá až na nejnižší naměřenou hodnotu 0,3-0,5 MPa.

Na teplotě 1200 °C došlo k rozdělení výsledků podle množství použitého hrubého kameniva nižší frakce.



Obr. 71: Pevnost v tahu za ohybu ohybem jednotlivých receptur (čtyř bodový ohyb)

Nejnižší nárůst pevnosti po 1000 °C vykazala receptura B, byť se při nižších teplotách chovala vůči teplotní degradaci jako odolnější. Naopak nejvyšších tlakových a tahových hodnot dosahuje receptura C, která byla vyrobena s použitím hrubého kameniva 4/8 mm Olbramovice. Toto chování by mohlo být vysvětleno menší frakcí použitých zrn. Při výpalu nad 1000 °C pomalu dochází k přechodu z hydraulických vazeb na keramické vazby, dochází k tvorbě Wollastonitu β (CaO-SiO_2) a částečnému slinování jednotlivých složek.

Při snížení rozměru kameniva se stejným součinitelem tepelné vodivosti, dojde uvnitř zrna k dosažení teplot potřebné pro fázové přeměny daleko dříve a s větší intenzitou než u receptury B, kde bylo použito hrubého kameniva 8/16 mm a 11/22 mm Olbramovice. To má za výsledek mírné zvýšení pevnosti při výpalu na 1200 °C u všech tří receptur a v případě C pak největší měrou.

Toto tvrzení by však bylo potřeba ověřit měřeními, který svým rozsahem nespádá do cílů této práce a je tedy prostorem pro další experimenty.

4.2.2.9 Schmidtův tvrdoměr

V rámci diagnostických průzkumů se používají různé nedestruktivní a semidestruktivní metody testování. Pro stanovení pevnosti betonu s nezaručenou pevností se nabízí využít Schmidtův tvrdoměr.

Pro měření touto metodou bylo postupováno dle normy ČSN EN 12504-2 pro provedení dané zkoušky. Pro měření byla vybrána zkušební tělesa receptury B, která slouží jako referenční receptura pro srovnání s ostatními testy.

Měření bylo provedeno na trámčích upnutých ve vertikální poloze v lise na 10 % zatěžovací síly, při překročení meze pevnosti dané teplotní sady, zjištěné z předešlých destruktivních zkoušek.

U trámců, které jevíly nesoudržnost povrchu jako je teplotní sada 800, 1000 a 1200 °C, byla použita dřevěná vložka pro rovnoměrné rozložení síly. Podoba upnutí a testování zkušebních těles je zobrazena na Obr. 72.



Obr. 72: Upnutí v lisu zkušebního tělesa degradovaného při 1200 °C

Z teplotních sad 20 až 1000 °C byly otestovány dva trámce, kde bylo provedeno celkem 10 měření. Teplotní sadu 1200 °C pak zastupovaly celkem čtyři trámce. Z každého měření byla následovně vyjádřena hodnota pevnosti v tlaku s nezaručenou přesností f_{be} . Sumarizace měření je uvedena v Tab. 9.

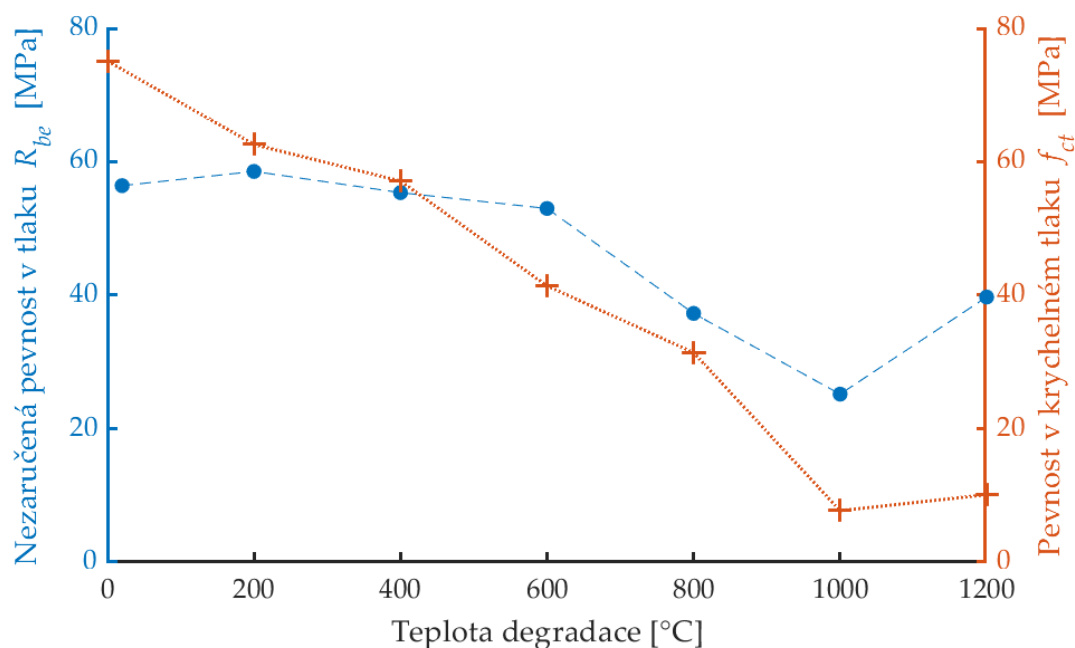
Tab. 9: Měření Schmidtovým tvrdoměrem

Teplota degradace [°C]	20	200	400	600	800	1000	1200
Pevnost v tlaku f_c [MPa]	75,1	62,6	57,1	41,4	31,4	7,7	10,1
Krychelná pevnost v tlaku s nezaručenou přesností R_{be} [MPa]	56,4	58,6	55,4	53,0	37,3	25,2	39,7
Koeficient korelace R^2 [-]	0,798						

Srovnání průměrných měřených pevností v tlaku dle ČSN EN 12 390-3 [107] s všemi měřenými hodnotami jednotlivých teplotních sad jsou uvedena na

Obr. 73. Pokud vyjádříme koeficient korelace R^2 obou měřených sad, dosahujeme hodnoty 0,798 na hladině významnosti 5 %. Pokud stanovíme koeficient korelace pouze pro teplotně degradované série od 400 do 1200 °C, dosahujeme ještě nižší hodnoty 0,759. Při pohledu na rozptyl měřených hodnot lze vidět, že měření např. teplotní sady 1200 °C zasahuje svými hodnotami do měření teplotních sad 800 a 600 °C, díky čemuž by bylo značně komplikované rozlišit mezi sebou tyto teplotní stupně degradace.

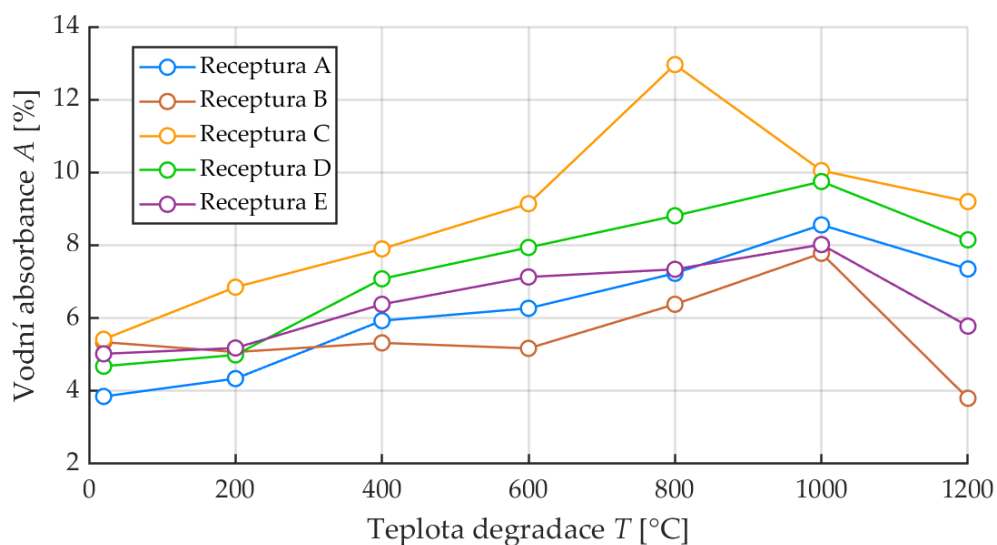
Podobně tomu je u teplotních sad od 20 °C do 600 °C, kdy v podstatě nejde poznat, o jak teplotně degradovaný beton se jedná. Proti tomu nicméně jasně hovoří výsledky destruktivních zkoušek této receptury jednotlivých teplotních sad, kde jsou až 10 MPa rozdíly.



Obr. 73: Srovnání pevnosti v tlaku se nezaručenou přenosností z tvrdoměrné zkoušky a pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech z destruktivní zkoušky

4.2.2.10 Nasákavost a porozita

Nasákavost byla stanovena pomocí normy ČSN 73 1316 [108], kdy byly vybrány úlomky betonu nepravidelného tvaru, na kterých byla stanovena nasákavost varem. Tato zkouška byla stanovena vždy na 4-6 úlomcích trámů z destruktivních zkoušek jednotlivých teplotních sad všech 5 receptur. Výsledné průměrné nasákavosti A jsou znázorněny na Obr. 74.



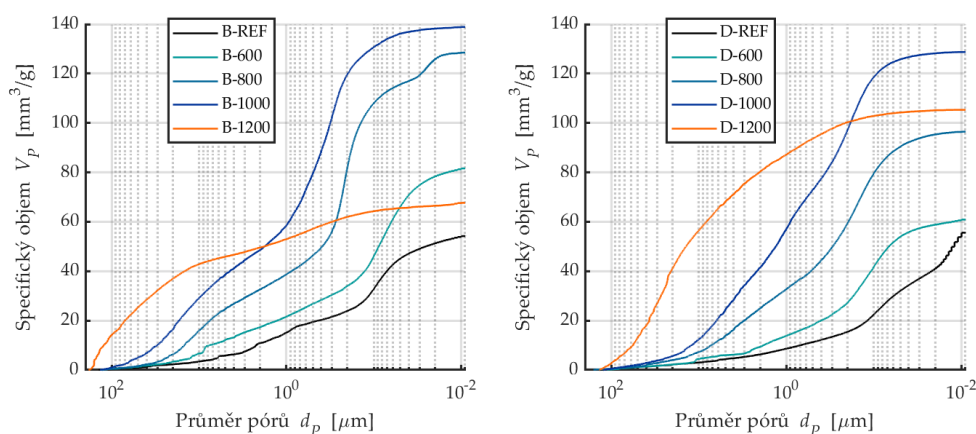
Obr. 74: Průměrná vodní absorbance vyjádřená k suchému vzorku

Nasákavost referenčních zkušebních těles nabývala hodnot 4-5,8 %, kdy nejnižší hodnoty dosahovala receptura A a nejvyšší hodnoty dosahovala receptura C. Při následné tepelné degradaci zkušebních těles došlo k postupnému nárůstu vodní absorbance, kdy maximum pro receptury A, B, D a E nastalo při teplotě 1000 °C.

Receptura C celkově vykazuje nejvyšší hodnoty vodní absorpance a maximum naopak nastalo při teplotě 800 °C. Od této teploty následovalo mírné snížení vodní absorpance až na hodnotu 9,3 %, což je maximum mezi měřenými recepturami při této teplotě.

Z pohledu návrhu zkoušených receptur tedy lze říct, že podobné nasákavosti dosahují receptury se stejnou kompozicí hrubého kameniva a použitého cementu CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R (receptura B a E).

Pro porozimetrickou analýzu bylo vybráno 5-6 úlomků, které byly měřeny pomocí rtuťové porozimetrie. Tato metoda byla uplatněna na recepturách, ve kterých byl použit CEM I 42,5 R a CEM II/A-S 42,5 N (receptura B a D). Specifický objem pórů obou receptur vybraných teplotních sad je uveden na Obr. 75. Z tohoto měření jde zpozorovat mírně odlišný trend u obou receptur, kdy se zvyšující se teplotní degradací se zvyšuje počet pórů menších průměrů (0,001-1 μm). Jak se zvyšuje teplota degradace, přibývá i objem větších pórů. Tento vývoj má své maximum při teplotě 1000 °C, s tím že receptura B dosahuje většího množství pórů mezi 0,01-1 μm než receptura D, kde je tento nárůst plynulý už od 10 μm .



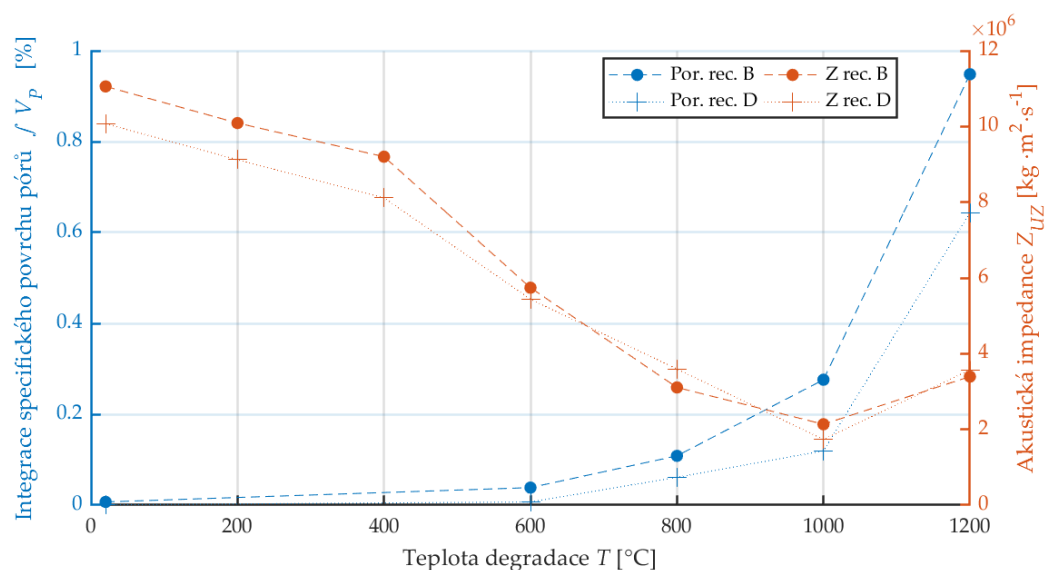
Obr. 75: Rtuťová porozimetrie vybraných dvou receptur

Při překročení teploty 1200 °C dochází k náhlé razantní změně v měřeném specifickém objemu u obou receptur. Skokově dochází k nárůstu zastoupení velkých pórů, s tím že receptura B vykazuje větší nárůst velkých pórů >10 μm .

Zatímco u receptury B dosahuje specifický objem maximálně hodnot 66 mm^3/g , receptura D dosahuje hodnot 107 mm^3/g .

Množství, distribuce a velikost pórů v materiálu má vliv na mnoho materiálových vlastností, jako jsou tepelně izolační vlastnosti, či pevnosti v tlaku či tahu. V případě této práce se tedy vybízí srovnat výsledky rtuťové porozimetrie s akustickou impedancí, která popisuje prostupnost materiálu pro mechanické vlny.

Pro tento účel je však potřeba provést integraci každého dílčího měření teplotní sady receptury B a D. Výstupem je součet součinů všech dílčích specifických objemů a jejich příslušných průměrů. Tento způsob integrace křivky specifického objemu pórů lze v literatuře běžně dohledat, jako příklad lze uvést publikaci E. Niwa [109]. Srovnání obou parametrů je uvedeno na Obr. 76. Pro přehlednost je integrace specifického objemu pórů uvedena v relativním měřítku.



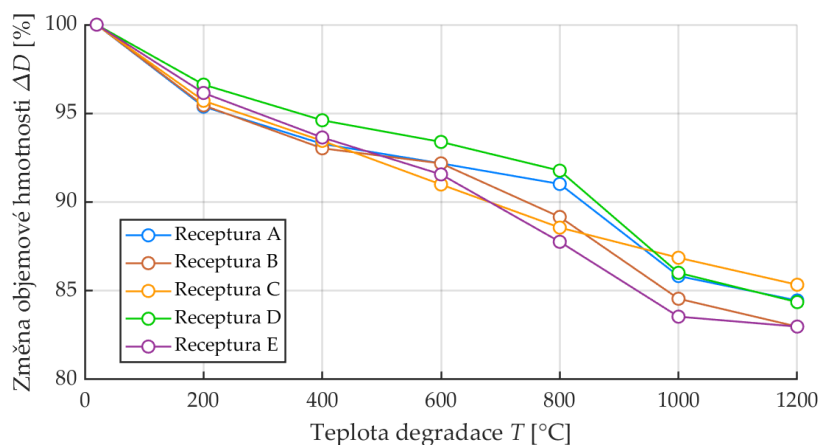
Obr. 76: Srovnání akustické impedance (červeně) a integrace specifického objemu (modře) pro recepturu B a D

Postupně zvyšující teplotní degradace snižuje akustickou impedanci obou receptur a zvyšuje jejich pórovitost. Při teplotní degradaci mezi teplotami 1000 a 1200 °C dochází k nejvyššímu přírůstu porozity a u akustické impedance dochází k opětovnému navýšení téměř na úroveň teplotní sady degradované při 800 °C.

4.2.2.11 Změna objemové hmotnosti

V rámci teplotního výpalu byla zjištěna objemová hmotnost D před a po výpalu u všech zkušebních těles všech 5 receptur. Z objemové hmotnosti před a po výpalu byla stanovena hodnota ztráta žháním ΔD , která je znázorněna na Obr. 77. Tato změna je vyjádřena procentuálním poměrem objemové hmotnosti po degradaci ku objemové hmotnosti před degradací.

První větší změnu v objemové hmotnosti lze zaznamenat mezi referenčním stavem a sadami degradovanými při 200 °C, kde je pokles napříč všemi recepturami v rozmezí 3-5 %. Tato změna převážně koresponduje s odparem fyzikálně vázané vody. Průměrná hmotnost těchto trámů se pohybuje v referenčním stavu okolo 9,2 kg, ztráta 4 % je tedy úměrná 0,36 kg fyzikálně vázané vody což je rovno 3,9 % absolutní vlhkosti.



Obr. 77: Vyjádření ztráty hmotnosti po výpalu

Výpal na teploty 200 °C a více měl nižší vliv na ztrátu hmotnosti. Nejnižší následný pokles hmotnosti se projevil u těles podle receptury A, která při 1200 °C dosahovala ztráty žháním 15 %. Naopak tělesa receptury B dosahovala při výpalu na teplotu 1200 °C nejvyššího poklesu 17 %.

Tělesa dle receptury E s použitým cementem CEM I 42,5 R projevila při teplotní degradaci výraznější pokles hmotnosti na teplotách 400, 600 a 800 °C nicméně tento pokles se po výpalu na 1000 °C zastavil a zůstal téměř nezměněn i po degradaci při teplotě 1200 °C.

Tab. 10: Významné korelační koeficienty R^2 pro Δm , D a T

-	T	Δm	D
T	1,000	0,832	0,817
Δm	0,832	1,000	0,869
D	0,817	0,869	1,000

Při pohledu na korelaci mezi jednotlivými metodami (kapitola 4.2.3 Korelace měřených hodnot) a změnou objemové hmotnosti, existuje pouze malá korelace, která z většiny nepřesahuje hodnoty $R^2 > 0,7$. Pouze korelace mezi teplotou degradace T a změnou objemovou hmotností po výpalu D dosahuje hodnot 0,832 a 0,869, jak dokazuje Tab. 10.

Vývoj objemové hmotnosti lze doložit Tab. 11, kde jsou uvedeny jednotlivé finální objemové hmotnosti po výpalu a jejich procentuální změna vztažená k referenčním teplotním sadám uchovaných při laboratorních podmínkách. Referenční teplotní sady dosahovaly svou objemovou hmotností D hodnot 2210–2380 kg·m⁻³. Nejvyšší celkový pokles objemové hmotnosti nastal v případě receptury B, kdy při výpalu na 1200 °C klesla objemová hmotnost na hodnotu 2060 kg·m⁻³ což odpovídá poklesu o téměř 14 %.

Tab. 11: Změny objemové hmotnosti před a po výpalu jednotlivých receptur

Teplota T [°C]	Objemová hmotnost po výpalu D [kg·m ⁻³]					Změna objemové hmotnosti ΔD [%]				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
20	2420	2430	2320	2390	2350	100	100	100	100	100
200	2270	2310	2230	2290	2250	95	95	96	97	96
400	2220	2270	2140	2280	2210	93	93	93	95	94
600	2240	2240	2120	2260	2170	92	92	91	93	92
800	2230	2220	2090	2230	2080	91	89	89	92	88
1000	2120	2080	2050	2090	1980	86	85	87	86	84
1200	2010	1950	1980	2050	1950	84	83	85	84	83

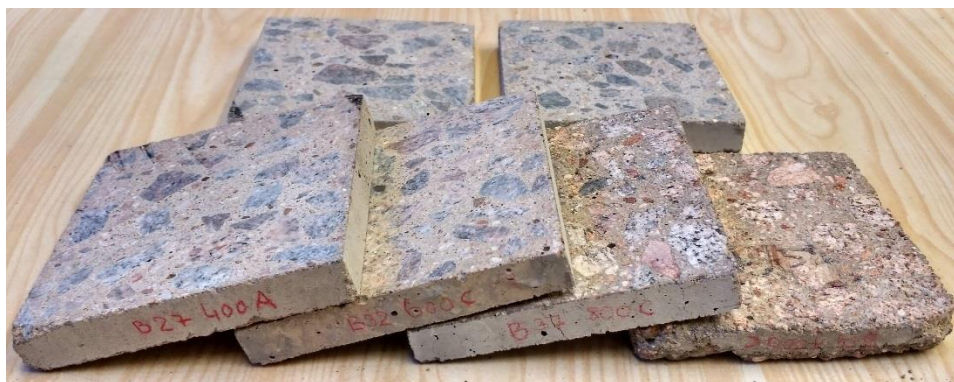
4.2.2.12 Frekvenční impedanční spektroskopie

Z pohledu rozdělení dielektrik je beton směsí dielektrika krystalického a amorfního. Dielektrika obecně umožňují v případě vystavení stejnosměrného či střídavého proudu

hromadit elektrický náboj. V případě stejnosměrného proudu dochází k statické polarizaci dipólových molekul materiálu. Zde se bavíme o statické relativní permitivitě ϵ_s . Pokud je dielektrikum vystaveno střídavému elektrickému poli, stává se permitivita právě funkcí frekvence tohoto střídavého pole a poté se bavíme o relativní permitivitě ϵ_r , která je též definována jako poměr kapacity C_k kondenzátoru s kapacitou dielektrika C_0 . Jedná se tedy o bezrozměrnou veličinu [110]⁷.

V případě měření relativní permitivity materiálu jako je právě beton, se projevuje vliv dielektrické relaxace, kdy jednotlivé dipóly dielektrických složek materiálu nedokážou dostatečně rychle reagovat svým přepólováním na změnu střídavého elektrického pole. Tím dostáváme reálnou část relativní permitivity ϵ' a její imaginární část ϵ'' . Imaginární část se též nazývá ztrátové číslo a reprezentuje ztráty vzniklé v dielektriku namáhané střídavým elektrickým polem.

V rámci provedeného měření byly testovány celkem tři receptury a to A, B a C. Z každé teplotní sady všech tří receptur byla vybrána zkušební tělesa, která byla nařezána na plátky o tloušťce 2 cm. Takto vyrobená zkušební tělesa pro měření relativní permitivity ϵ^{-1} a elektrické vodivosti σ^{-1} byla ponechána v laboratorním prostředí po dobu 30 dnů za teploty $21 \pm 0,5$ °C. Všechna zkušební tělesa tedy byla při stejné relativní vlhkosti v průběhu měření.



Obr. 78: Srovnání vzorků připravených z degradovaných trámů pro provedení zkoušky

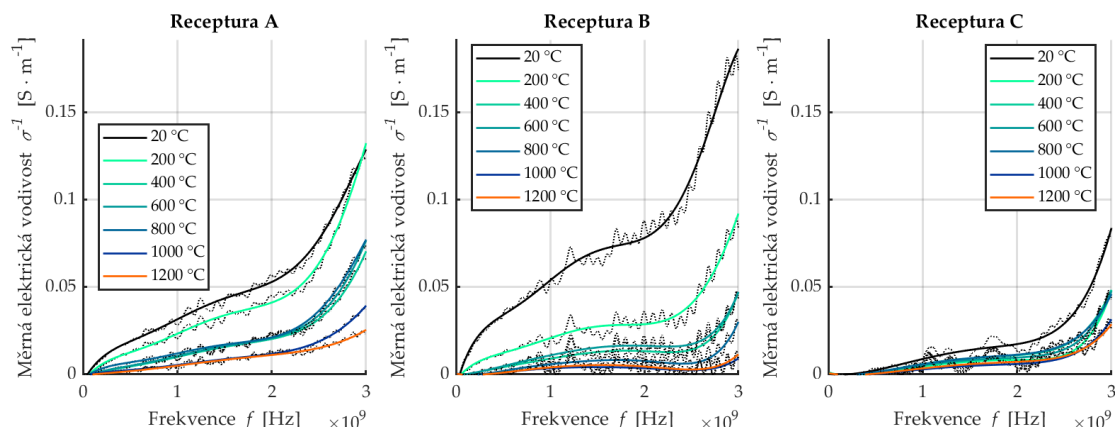
Na Obr. 78 lze vidět podobu připravených zkušebních těles. Jasně lze rozpoznat rozdíl jak v barvě, tak ve struktuře jednotlivých sad. Na tomto snímku jsou vyobrazena tělesa receptury B, a podobnou strukturu jevila i tělesa receptur A a C.

Na Obr. 79 je znázorněn výstup měření měrné elektrické vodivosti jednotlivých receptur A, B a C všech teplotních sad 20–1200 °C. Osa y je pro všechny grafy ve stejném měřítku a lze vidět, že nejvyšších hodnot měrné elektrické vodivosti dosahuje právě receptura B, a to referenční sada, která nebyla vystavena teplotnímu namáhání. Součástí grafu je i polynomická spojnice trendu všech teplotních sad všech testovaných receptur A, B a C.

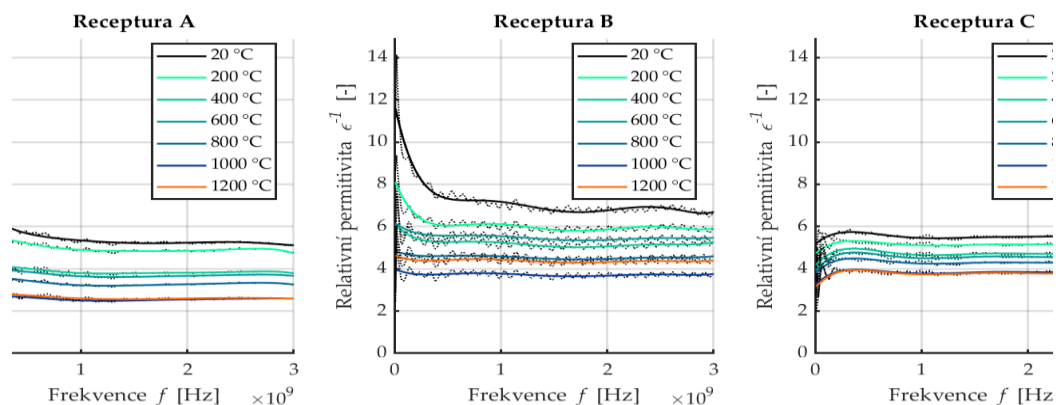
S postupně zvyšujícím se teplotním namáháním se v rámci použitého frekvenčního rozsahu hodnota σ^{-1} snižuje z hodnot $0,19 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ až do oblastí pod $0,10 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Při překročení teploty 1000 °C pak vidíme že křivka měrné elektrické vodivosti při 1000 °C téměř kopíruje křivku při 1200 °C. Tento vývoj kopírují i receptury A a C, které však

⁷ Prezentované výsledky byly měřeny a publikovány v článku I. Kusáka a kolektiv [127]

dosahují nižších hodnot, kdy nejvyšší měřené hodnoty σ^{-1} byly u receptury A, a to $0,13 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, a u receptury C to bylo pod $0,1 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$.

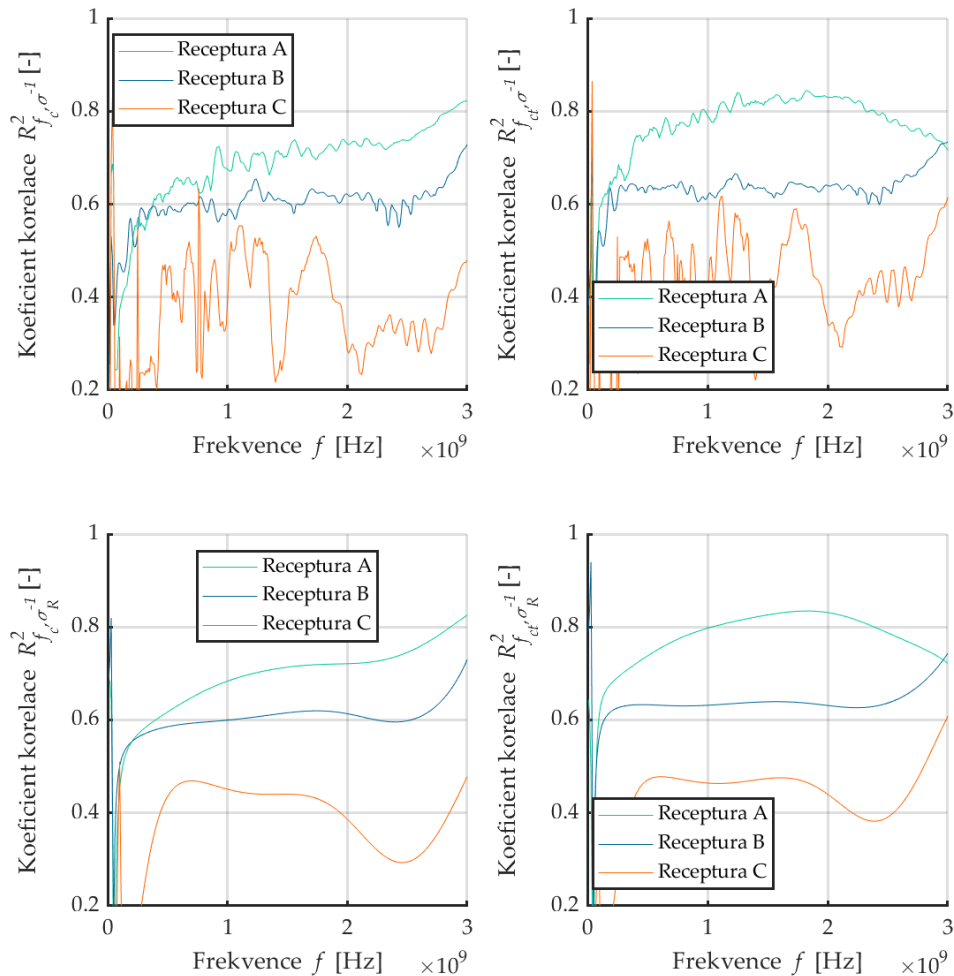


Obr. 79: Výsledky z měření měrné elektrické vodivosti



Obr. 80: Měřená permitivita (tečkovaně) proložena polynomicou spojnicí trendu 6. stupně pro všechny teplotní sady receptur A, B a C

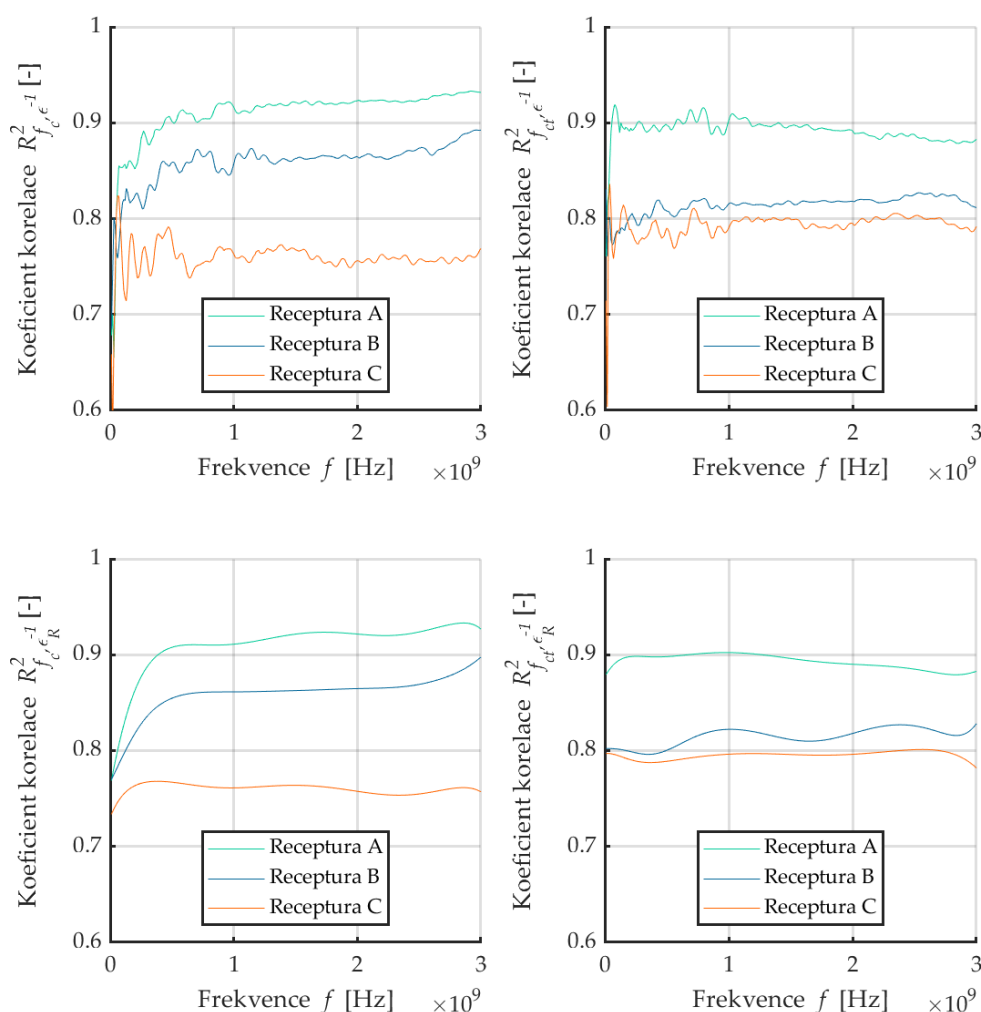
Pokud chceme použít měření měrné elektrické vodivosti σ^{-1} jako kondiční ukazatel stavu materiálu z pohledu teplotní degradace, není tento výsledek příliš vypovídající. Toto tvrzení lze podložit Obr. 81, kde je vyjádřen koeficient korelace R^2 mezi pevností v tlaku f_c a pevností v tahu za ohybu f_{ct} , které jsou dále zevrubně popsány v kapitola 4.2.2.8 Výsledky destruktivních zkoušek.



Obr. 81: Srovnání korelačního koeficientu R^2 pro všechny vybrané body měrné elektrické vodivosti σ^{-1} v původní variantě (horní grafy), variantě polynomicke regresní funkce (dolní grafy) s pevností v tlaku f_c (vlevo) a pevností v tahu za ohybu f_{ct} (vpravo)

V tomto zobrazení byly postupně vybrány body ze všech 7 měření příslušných teplotních sad. Poté byla vyjádřena korelace s hladinou významnosti 0,05 mezi těmito sedmi body a hodnotami pevnosti v tlaku a tahu pro jednotlivé teplotní sady (dostáváme tedy 7 bodů pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu pro každou recepturu). Toto bylo zopakováno pro všechny body křivek v celé frekvenční oblasti. Výstupem je tedy křivka kolísající korelace mezi měřenou měrnou elektrickou vodivostí v celém frekvenčním rozsahu 0-3 GHz a pevností v tlaku (vlevo) a pevností v tahu (vpravo).

Toto vyjádření korelace je zároveň provedeno jak pro původní měřená data (horní grafy) tak pro jejich polynomickou spojnicí trendu, která do jisté míry snižuje negativní efekt kolísání měřené veličiny, který je patrný při všech měření jak měrné elektrické vodivosti, tak permitivity.



Obr. 82: Srovnání korelačního koeficientu R^2 pro všechny vybrané body měrné elektrické permitivity $\sigma^{-1}v$ (horní grafy), s polynomicou regresní funkcí (dolní grafy) s pevností v tlaku f_c (vlevo) a pevností v tahu za ohybu f_{ct} (vpravo)

Z vyjádření na Obr. 82 lze zpozorovat, že oblast s nejvyššími hodnotami korelačního koeficientu mezi pevností v tlaku, či tahu nastává v oblasti 1-2 GHz. Pokud tedy vyjádříme tuto hodnotu koeficientu korelace z průměru oblasti 1-2 GHz jak měrné elektrické vodivosti, tak permitivity, dostaneme hodnoty, které reprezentují optimální frekvenční oblast, se kterou je vhodné korelovat destruktivní zkoušky. Tyto hodnoty jsou uvedené v Tab. 12.

Tab. 12: Srovnání průměrné hodnoty koeficientu spolehlivosti $\overline{R^2}$ a jeho rozptylu S^2 v oblasti 1-2 GHz mezi originálně měřenými daty (σ^{-1} a ε^{-1}) a jejich spojnicí trendu (σ_R^{-1} a ε_R^{-1}) a pevností v tlaku f_c a tahu f_{ct} pro receptury A, B a C

Receptura	typ	Měrná elektrická vodivost		typ	Permitivita	
		$\overline{R^2}$	S^2		$\overline{R^2}$	S^2
A	$R_{f_c, \sigma^{-1}}^2$	0,841	0,011	$R_{f_c, \varepsilon^{-1}}^2$	0,958	0,002
	$R_{f_{ct}, \sigma^{-1}}^2$	0,906	0,009	$R_{f_{ct}, \varepsilon^{-1}}^2$	0,947	0,002
	$R_{f_c, \sigma_R^{-1}}^2$	0,842	0,007	$R_{f_c, \varepsilon_R^{-1}}^2$	0,959	0,002
	$R_{f_{ct}, \sigma_R^{-1}}^2$	0,907	0,006	$R_{f_{ct}, \varepsilon_R^{-1}}^2$	0,947	0,002
B	$R_{f_c, \sigma^{-1}}^2$	0,782	0,011	$R_{f_c, \varepsilon^{-1}}^2$	0,929	0,002
	$R_{f_{ct}, \sigma^{-1}}^2$	0,797	0,007	$R_{f_{ct}, \varepsilon^{-1}}^2$	0,904	0,0009
	$R_{f_c, \sigma_R^{-1}}^2$	0,783	0,004	$R_{f_c, \varepsilon_R^{-1}}^2$	0,929	0,0005
	$R_{f_{ct}, \sigma_R^{-1}}^2$	0,798	0,002	$R_{f_{ct}, \varepsilon_R^{-1}}^2$	0,903	0,002
C	$R_{f_c, \sigma^{-1}}^2$	0,656	0,072	$R_{f_c, \varepsilon^{-1}}^2$	0,872	0,004
	$R_{f_{ct}, \sigma^{-1}}^2$	0,678	0,078	$R_{f_{ct}, \varepsilon^{-1}}^2$	0,892	0,002
	$R_{f_c, \sigma_R^{-1}}^2$	0,658	0,012	$R_{f_c, \varepsilon_R^{-1}}^2$	0,873	0,0009
	$R_{f_{ct}, \sigma_R^{-1}}^2$	0,683	0,006	$R_{f_{ct}, \varepsilon_R^{-1}}^2$	0,892	0,0003

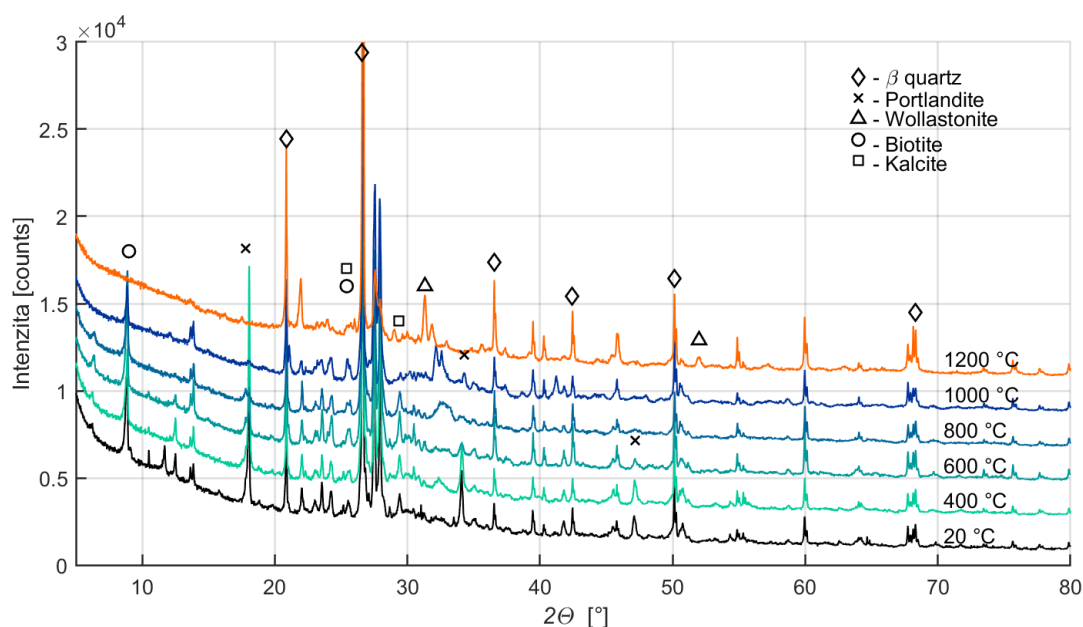
Uvedené hodnoty pro recepturu A dosahují ze všech měření nejvyšších hodnot korelace, a lze je tedy nejlépe ze všech měření použít pro popis mechanického stavu teplotně degradovaného betonu. V případě tohoto měření lze tuto interpretaci vztáhnout pouze na recepturu A, u dalších dvou receptur s odlišným složením dosahují koeficienty korelace R^2 nižších hodnot. Tento závěr lze dále využít v kapitole 4.2.3 Korelace měřených hodnot pro srovnání korelace se všemi ostatními použitými metodami testování.

4.2.2.13 Rentgenová difrakční spektrometrie

Vzorky pro provedení RTG analýzy byly vybrány z čel zkušebních těles po provedení destruktivní zkoušky. Samotné měření proběhlo ve výzkumném centru ADMAS, kde bylo využito analytického přístroje Difraktometr Empyrean PANalytical. Pro účel analýzy byly vybrány úlomky zkušebních těles jednotlivých teplotně degradovaných receptur. Jedná se o části zkušebních těles, které byly po 1 hodině teplotní výdrže v peci zaručeně degradovány cílovou teplotou.

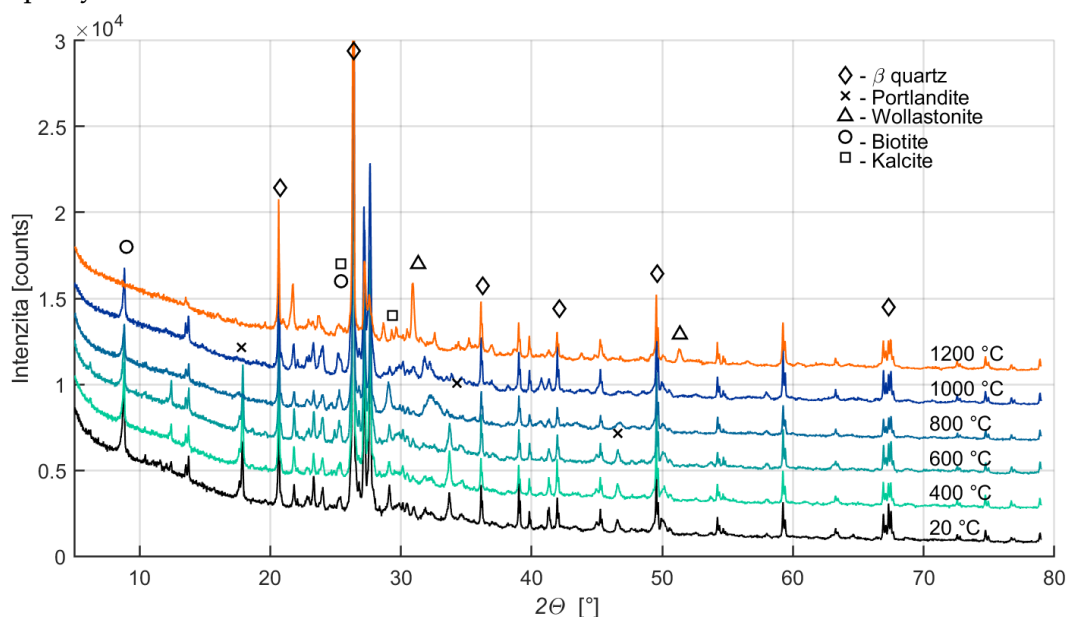
Jednotlivé difraktogramy jsou znázorněné na Obr. 83 pro recepturu B a na Obr. 84 pro recepturu D. Jednotlivé teplotní sady jsou od sebe pro přehlednost posunuty o 2000 countů. Teplotní sada degradovaná při 200 °C byla též analyzována, nicméně její spektrum je téměř totožné s referenční sadou a pro účel posuzování je tedy z prezentovaných grafů vynechána.

Z pohledu mineralogických změn lze zpozorovat v referenční sadě přítomnost minerálů biotitu, β -křemene, kaolinitu a kalcitu typických pro použité kamenivo [111]. Z pohledu cementové matrice je přítomný portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který se začíná rozkládat od 400 °C. V případě receptury B se vrchol korespondující s portlanditem ztrácí při 800 °C a při vyšší teplotě již nejde rozeznat. Podobných výsledků dosahuje i receptura D, kde se též při 800 °C vrcholy portlanditu ztrácejí.



Obr. 83: Výstup rentgenové difrakční analýzy receptury B. Jednotlivé difraktogramy jsou pro přehlednost od sebe odsazené o 2000 jednotek

Biotit lze rozeznat do 1000 °C. Jak uvádí Zhou a kolektiv [8], biotit se za daných podmínek rozkládá okolo 900 °C. Tento rozklad biotitu lze detekovat v obou případech receptury B a D.



Obr. 84: Výstup rentgenové difrakční analýzy receptury D. Jednotlivé difraktogramy jsou pro přehlednost od sebe odsazené o 2000 jednotek

Zajímavá oblast difraktogramů se nachází mezi úhlem 30-35°, kde nejprve lze pozorovat rozklad portlanditu a již od 800 °C vznik nových fází. Z těchto lze rozeznat například minerál wollastonit CaO-SiO_3 . Od teploty 1200 °C začíná vznikat z rozložených složek tavenina, která má již částečně amorfni strukturu, jejíž podrobnější strukturu nelze rozeznat pomocí rentgenové difrakční analýzy. V této teplotní oblasti jsou v betonu jeho hydraulické vazby pomalu nahrazovány vazbami keramickými [9].

4.2.3 Korelace měřených hodnot

Pro posouzení jednotlivých metod použitých této práci byla zpracována korelační tabulka, která mezi sebou porovnává všechny zkušební metody, které se shodovaly pro všechny receptury. Dílčí výsledky teplotních sad lze vyjádřit jedním číslem. Není zde proto zahrnuto měření rentgenové difrakční analýzy.

V Tab. 13 jsou uvedeny jednotlivé koeficienty korelace R^2 u receptury B, která byla testována všemi použitými metodami. Každý koeficient vyjadřuje korelaci mezi všemi teplotními sadami dané receptury. Jsou porovnávány metody a korelace jejich měřených výsledků mezi sebou navzájem.

Ze všech měření jsou pak vyznačeny významné korelace mezi výsledky destruktivních zkoušek a nedestruktivního testování a jakož i změny materiálových vlastností jako jsou objemová hmotnost D či vodní absorbance A .

Některé korelační koeficienty dosahují velmi nízkých hodnot, například korelace mezi vodní absorbancí A a měrnou elektrickou vodivostí σ^{-1} dosahuje hodnoty 0,03. Výsledky těchto dvou metod nejsou na sobě závislé v případě měření teplotní degradace betonu. Opačným příkladem je korelace mezi časem signálu akustické emise t_{AE} a relativní permitivitou ε^{-1} , který dosahuje velmi vysoké korelace 0,951. Podobných zajímavých zjištění je napříč provedenými měřeními celá řada.

Z pohledu technické diagnostiky je potřeba definovat, jaký parametr u daného materiálu či konstrukce je potřeba sledovat, což je dáno i celým účelem a cílem dané diagnostiky.

Měřené pevnosti v tlaku f_c a v tahu f_{ct} vykazují velice dobrou korelaci ($>0,9$) pro výsledky měření metody IE ve všech posuzovaných frekvencích ($f_L, f_{t,1}, f_{t,2}, f_i$), akustickou impedancí Z_{uz} , dynamickým modulem pružnosti E_{cu} .

Pro účely materiálového testování je to poměrně dobrý důvod, proč považovat tyto akustické metody za vhodný nástroj pro popis míry degradace zkušebních těles. V případě, že však bude potřeba posuzovat zkušební těleso odebrané z konstrukce, která byla degradována neznámou teplotou, nastává problém při posuzování teplotního poškození v oblasti 800-1200 °C z důvodu možnosti záměny jejich měřených parametrů.

Zároveň v oblasti 400-800 °C vykazují jednotlivé metody relativně vysoký rozptyl měřených veličin, což může dále znesnadňovat zatřídování neznámého vzorku do příslušného stupně teplotního poškození.

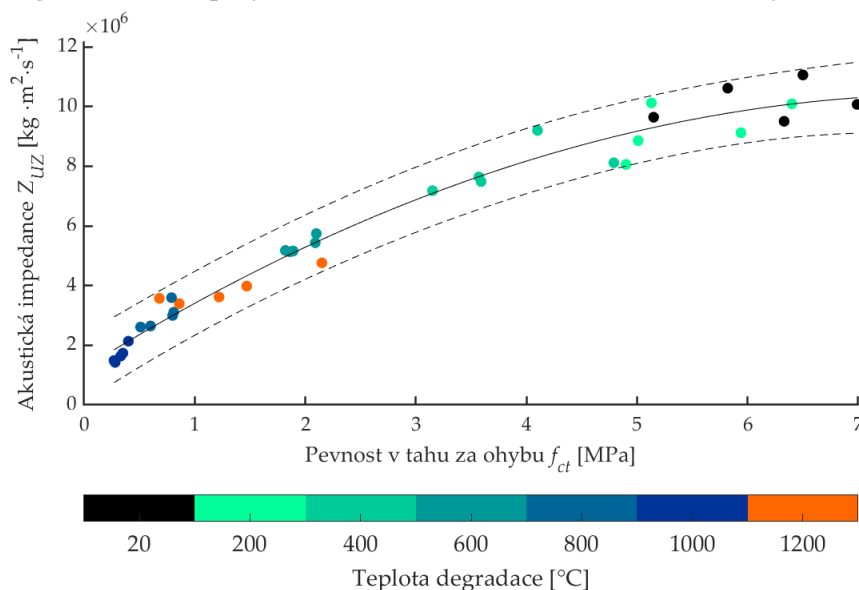
Tab. 13: Korelační koeficienty R_{cor^2} mezi jednotlivými měřeními, vždy pro celou teplotní sadu receptury B

-	T	ΔD	A	D	V_L	f_L	$f_{t,1}$	$f_{t,2}$	f_t	E_{CU}	Z_{UZ}	f_{ct}	f_c	R_{be}	t_{AE}	AE_{energie}	ε^{-1}	σ^{-1}	$\int V_P$
T	1,000	0,871	0,013	0,883	0,861	0,902	0,912	0,901	0,883	0,884	0,886	0,883	0,965	0,689	0,797	0,698	0,831	0,647	0,555
ΔD	0,871	1,000	0,028	0,839	0,769	0,803	0,806	0,806	0,736	0,852	0,811	0,860	0,832	0,524	0,788	0,924	0,878	0,914	0,199
A	0,013	0,028	1,000	0,033	0,160	0,135	0,134	0,143	0,160	0,096	0,137	0,098	0,066	0,355	0,232	0,043	0,164	0,03	0,189
D	0,883	0,839	0,033	1,000	0,599	0,653	0,662	0,649	0,604	0,684	0,645	0,674	0,776	0,361	0,570	0,701	0,653	0,694	0,665
V_L	0,861	0,769	0,160	0,599	1,000	0,994	0,989	0,993	0,985	0,976	0,997	0,944	0,901	0,849	0,800	0,688	0,794	0,536	0,210
f_L	0,902	0,803	0,135	0,653	0,994	1,000	0,999	1,000	0,990	0,972	0,996	0,949	0,929	0,853	0,827	0,701	0,835	0,575	0,209
$f_{t,1}$	0,912	0,806	0,134	0,662	0,989	0,999	1,000	0,999	0,992	0,963	0,991	0,943	0,941	0,865	0,845	0,695	0,851	0,581	0,442
$f_{t,2}$	0,901	0,806	0,143	0,649	0,993	1,000	0,999	1,000	0,990	0,970	0,995	0,950	0,933	0,861	0,841	0,701	0,846	0,58	0,247
f_t	0,883	0,736	0,160	0,604	0,985	0,990	0,992	0,990	1,000	0,937	0,979	0,910	0,933	0,905	0,836	0,624	0,813	0,5	0,267
E_{CU}	0,884	0,852	0,096	0,684	0,976	0,972	0,963	0,970	0,937	1,000	0,987	0,975	0,889	0,732	0,765	0,783	0,789	0,626	0,242
Z_{UZ}	0,886	0,811	0,137	0,645	0,997	0,996	0,991	0,995	0,979	0,987	1,000	0,957	0,915	0,824	0,812	0,730	0,816	0,584	0,263
f_{ct}	0,883	0,860	0,098	0,674	0,944	0,949	0,943	0,950	0,910	0,975	0,957	1,000	0,868	0,723	0,770	0,736	0,816	0,636	0,134
f_c	0,965	0,832	0,066	0,776	0,901	0,929	0,941	0,933	0,933	0,889	0,915	0,868	1,000	0,799	0,893	0,690	0,864	0,613	0,251
R_{be}	0,689	0,524	0,355	0,361	0,849	0,853	0,865	0,861	0,905	0,732	0,824	0,723	0,799	1,000	0,832	0,411	0,762	0,346	0,214
t_{AE}	0,797	0,788	0,232	0,570	0,800	0,827	0,845	0,841	0,836	0,765	0,812	0,770	0,893	0,832	1,000	0,677	0,951	0,68	0,214
AE_{energie}	0,698	0,924	0,043	0,701	0,688	0,701	0,695	0,701	0,624	0,783	0,730	0,736	0,690	0,411	0,677	1,000	0,75	0,911	0,141
ε^{-1}	0,831	0,878	0,164	0,653	0,794	0,835	0,851	0,846	0,813	0,789	0,816	0,816	0,864	0,762	0,951	0,750	1,000	0,804	0,255
σ^{-1}	0,647	0,914	0,03	0,694	0,536	0,575	0,581	0,58	0,5	0,626	0,584	0,636	0,613	0,346	0,68	0,911	0,804	1,000	0,541
$\int V_P$	0,555	0,199	0,189	0,665	0,210	0,209	0,442	0,247	0,267	0,242	0,263	0,134	0,251	0,214	0,214	0,141	0,255	0,541	1,000

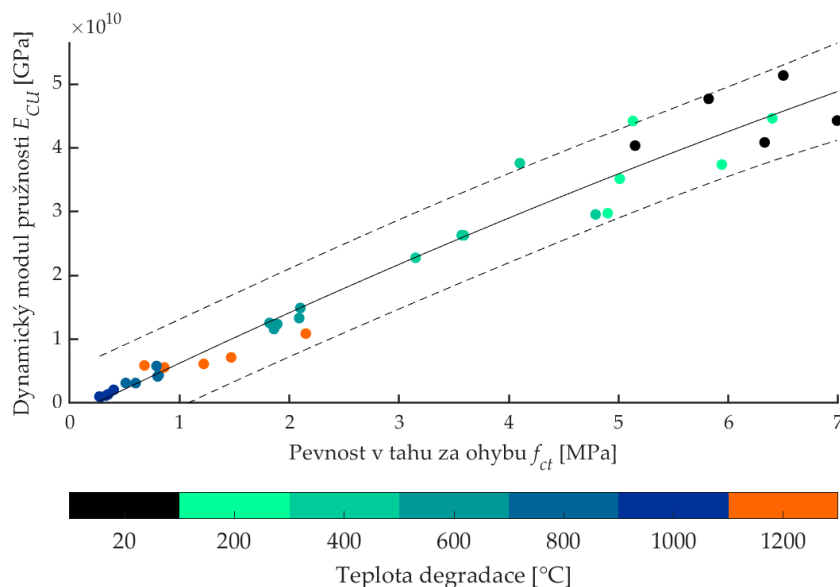
4.2.4 Vybrané korelační diagramy

Právě pro účely posouzení rozlišovací schopnosti jednotlivých metod při diagnostice vzorků degradovaných neznámou teplotou je vhodné vyjádřit korelační diagramy mezi zmíněnými metodami. Následující grafy uvedené na Obr. 85 až Obr. 88 dokumentují vybrané závislosti mezi měřenými veličinami.

Každá teplotní sada jedné receptury je reprezentována jedním bodem. Barvy bodů určují, na jakou teplotu byla daná série degradována. Pro přehlednost jsou srovnány všechny receptury bez rozlišení jednotlivých receptur. Každá datová sada je poté proložena regresní funkcí polynomu druhého řádu⁸ s 95 % intervalovým odhadem.



Obr. 85: Korelace mezi akustickou impedancí a pevností v tahu za ohybu

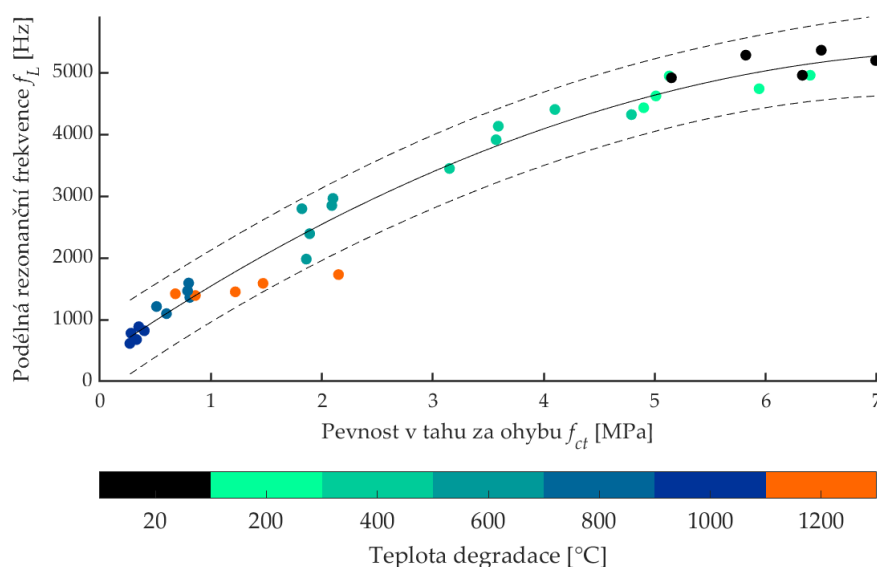


Obr. 86: Korelace mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tahu za ohybu

⁸ U tohoto polynomického stupně bylo dosaženo nejvyšší hodnoty stupně spolehlivosti R pro jednotlivé vybrané korelace

Na Obr. 85 až Obr. 88 lze rozlišit jednotlivé trendy, které více inklinují k lineární závislosti u metod testování jako třeba dynamický modul pružnosti a pevnost v tahu za ohybu. U měření pomocí destruktivních zkoušek jde dobře dokumentovat počáteční referenční stav, kdy jednotlivé receptury dosahují odlišných počátečních pevností. Při degradaci teplotou 200 a 400 °C je tento rozptyl stále zachován, i když hodnoty nabývají nižších pevností a dynamického modulu pružnosti. Od teploty 600 °C však dochází k výrazné změně, kdy se hodnoty začínají shlukovat a tvoří téměř jeden bod. Toto chování materiál vykazuje i při teplotách 800 a 1000 °C. Dochází zde k jakési materiálové normalizaci, kdy receptury různých pevností nabývají nižších ale téměř srovnatelných pevností. Podobný konkávní trend lze pozorovat i u měření akustické impedance a rezonanční frekvence podélného kmitání.

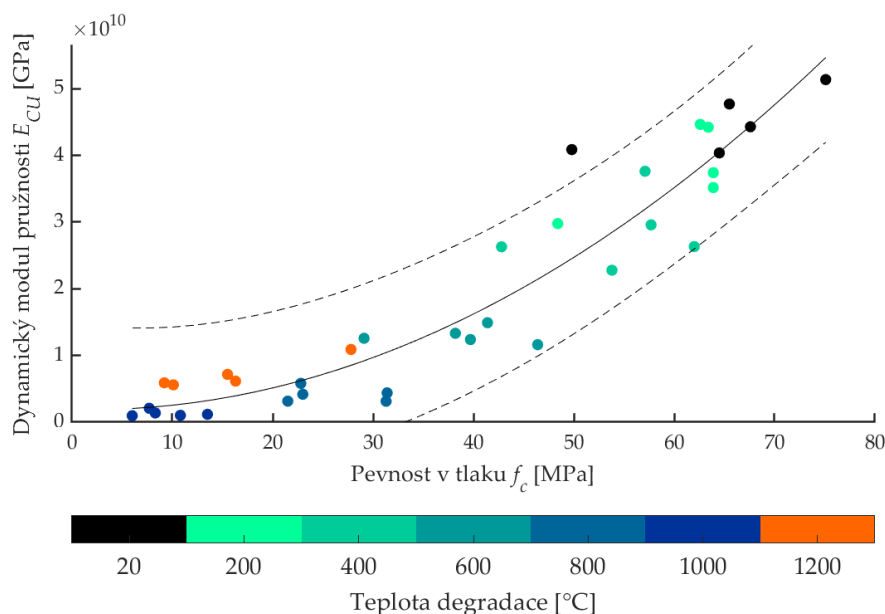
Pokud však pokračujeme v teplotní degradaci na 1200 °C, dochází k navýšení měřených veličin, a tyto hodnoty jsou ve stejné oblasti jako teplotní sady degradované při 800 a 1000 °C. Nabývají mírně vyšších hodnot, ale jejich rozptyl se po pevnostní stránce zvyšuje.



Obr. 87: Korelace mezi podélnou rezonanční frekvencí a pevností v tahu za ohybu

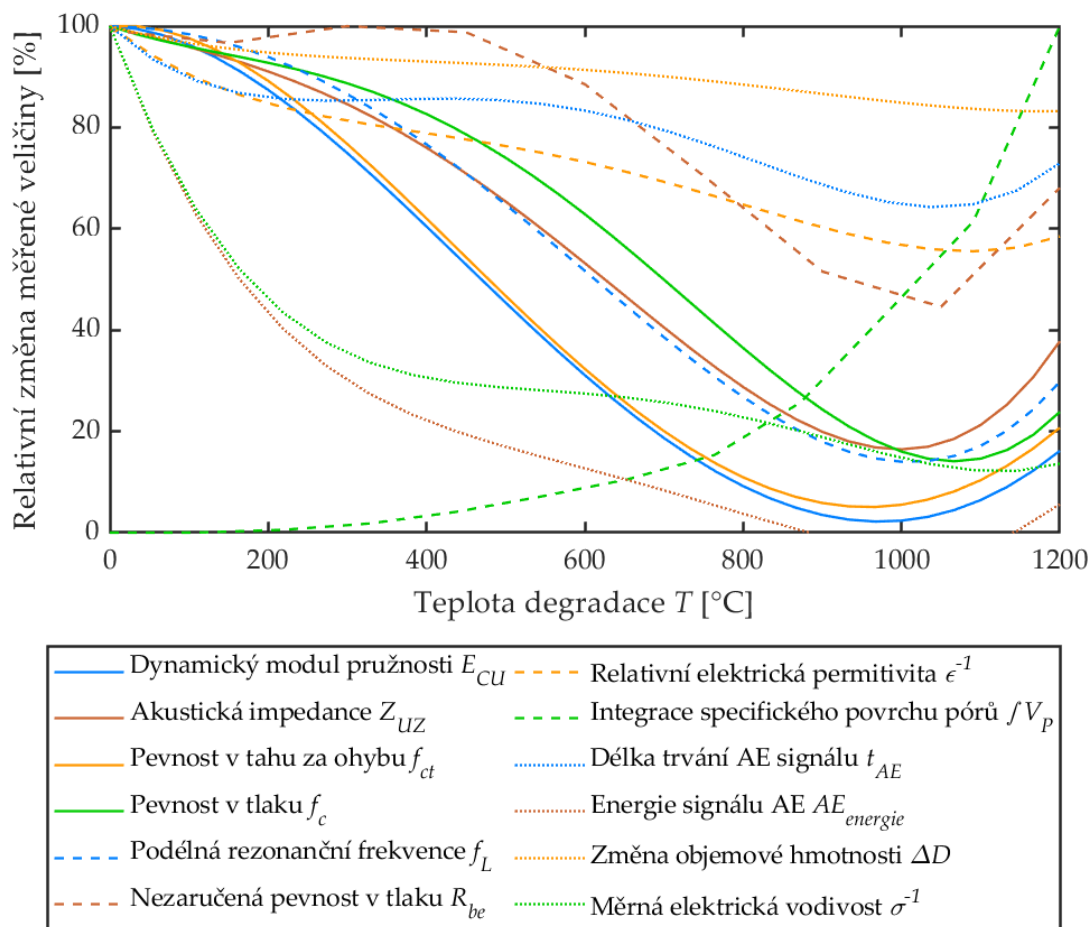
Při srovnání korelace mezi dílčími metodami a pevností v tahu dostáváme vysoké hodnoty korelace a zdá se, že tato fyzikálně materiálová vlastnost dobře koresponduje s nedestruktivně měřitelnými veličinami.

Naopak pevnost v tlaku dosahuje obecně nižší korelace a vykazuje vyšší rozptyl měřených hodnot, a to u všech testovaných receptur. Příkladem může být korelace mezi pevností v tlaku a dynamickým modulem pružnosti, která dosahuje hodnoty 0,790-0,932 pro jednotlivé receptury. Lepších hodnot korelace dosahuje pevnost v tlaku a rezonanční frekvence podélného či ohybového kmitání. Zároveň se chová odlišně opětovný nárůst pevnosti v tlaku po výpalu na 1200 °C a jeví charakter konvexní závislosti obou veličin.



Obr. 88: Korelace mezi dynamickým modulem pružnosti a pevností v tlaku

Schopnost popisovat teplotní degradaci všech receptur lze následovně vyjádřit pomocí relativní změny vybraných měřených veličin v závislosti na teplotě výpalu. Tuto závislost vyjadřuje Obr. 89, ze kterého je patrný charakter jednotlivých metod a jejich citlivost na teplotní degradaci betonu. Ideální citlivost by byla vyjádřena lineární závislostí, ke které se některé vybrané metody opravdu blíží.



Obr. 89: Průnik relativní změnou měřených veličin u všech testovaných receptur

Měřené materiálové parametry o vysoké vzájemné korelaci se překrývají, jako například akustická impedance a rezonanční frekvence podélného kmitání. Parametry, jako jsou měrná elektrická vodivost, energie signálu akustické emise či nezaručená pevnost v tlaku, jsou z tohoto pohledu nevhodnými nástroji, kde jednotlivé stavy teplotní degradace mají mezi sebou malé rozdíly a může tedy snáze dojít k záměně při zařazení do konkrétní teplotní oblasti.

4.2.5 Dílčí závěr

Testy a zkoušky provedené na teplotně degradovaném betonu pěti různých receptur poskytly poměrně detailní informaci o charakteru tohoto druhu poškození a schopnosti jednotlivých metod tohoto poškození charakterizovat. Ze všech použitých metod lze konkrétně jmenovat ty, které se pro popis a charakteristiku tohoto poškození hodí více či méně v závislosti na dosažených korelacích. Testování pomocí akustických metod se tedy jeví jako efektivní a přesný nástroj, který je ideální pro laboratorní materiálové testování.

Na základě vyjádřené korelace na Obr. 89 se pro stanovení míry degradace betonu zvýšenou teplotou jeví jako nejvhodnější parametry dynamický modul pružnosti E_{cu} , vlastní rezonanční frekvence f_L (potažmo i všechny ostatní měřené vlastní frekvence $f_{t,1}$, $f_{t,2}$ a f_t), akustická impedance Z_{uz} , pevnost v tlaku f_c a pevnost v tahu f_{ct} . Integrovaný specifický poměr pórů JV_p dosahuje obecně nízké korelace s jednotlivými metodami, nicméně s rostoucí tepelnou degradací se tato veličina chová lineárně a může dobře posloužit jako indikátor teplotního poškození ≥ 1000 °C.

Z těchto metod lze dále vyzdvihnout především metody akustického testování, které poskytují náhled na rovnoměrnou změnu mezi referenčním stavem a teplotně degradovaným stavem při 1200 °C.

Díky relativně jednoduchému instrumentálnímu vybavení lze celý úkon měření snadno automatizovat a lze jej používat pro průběžné sledování vývoje vlastností. Na této vlastnosti bylo založeno měření sledování sebehojení teplotně degradovaných kompozitů, zmíněných v příloze v kapitole 11.3 Využití IE pro sledování sebehojení.

Automatizace a programové zpracování měřených dat do formy datové struktury zároveň umožňují rychlé zpracování a prezentaci měřených dat. Díky těmto výsledkům vznikla poměrně rozsáhlá knihovna měřených veličin, která je logicky setříděna a je připravena na budoucí interpretaci měřených veličin, podrobnější analytické zpracování dat a vytváření modelů.

4.3 Testy na plošně vyztuženém železobetonovém prvku

Teplotní degradace zkušebních těles (trámců) v laboratorní peci umožňuje simulovat teplotní degradaci v praxi za jasně stanovených okrajových podmínek. Celý postup je však do jisté míry zjednodušen oproti reálné situaci.

V laboratorní peci dochází k prohřívání zkušebních těles ze všech stran a jedná se o relativně rovnoměrný proces, kdy je zkušební těleso zahříváno ze všech stran. Lze tedy říct, že těleso je homogenně teplotně degradováno a ve všech bodech bylo vystaveno

stejnému namáhání. Kvůli součiniteli tepelné vodivosti betonu⁹ tento proces v reálu rovnoměrný není, a povrchové a vnější vrstvy jsou degradovány více než jádro zkušebních těles, ale tento fakt je většinou autorů v této oblasti zanedbán a uvažuje se o rovnoměrně degradovaném objemu.

Při teplotní degradaci reálné konstrukce však dochází ke vzniku gradientů poškození, kdy části nejbližší ke zdroji tepla jsou nejvíce degradované, a od tohoto zdroje je intenzita teplotní degradace nižší až do stavu nedegradovaného. V závislosti na zdroji zvýšené teploty (například požár) však dochází k postupnému rozšiřování teplotně degradovaných oblastí.

Reálná teplotně degradovaná konstrukce se v praxi skládá z materiálu různě teplotně degradovaného. Pro tento stav je již podstatě složitější nalézt vhodný diagnostický postup, který by umožnil detekovat rozložení poškození v konstrukci.

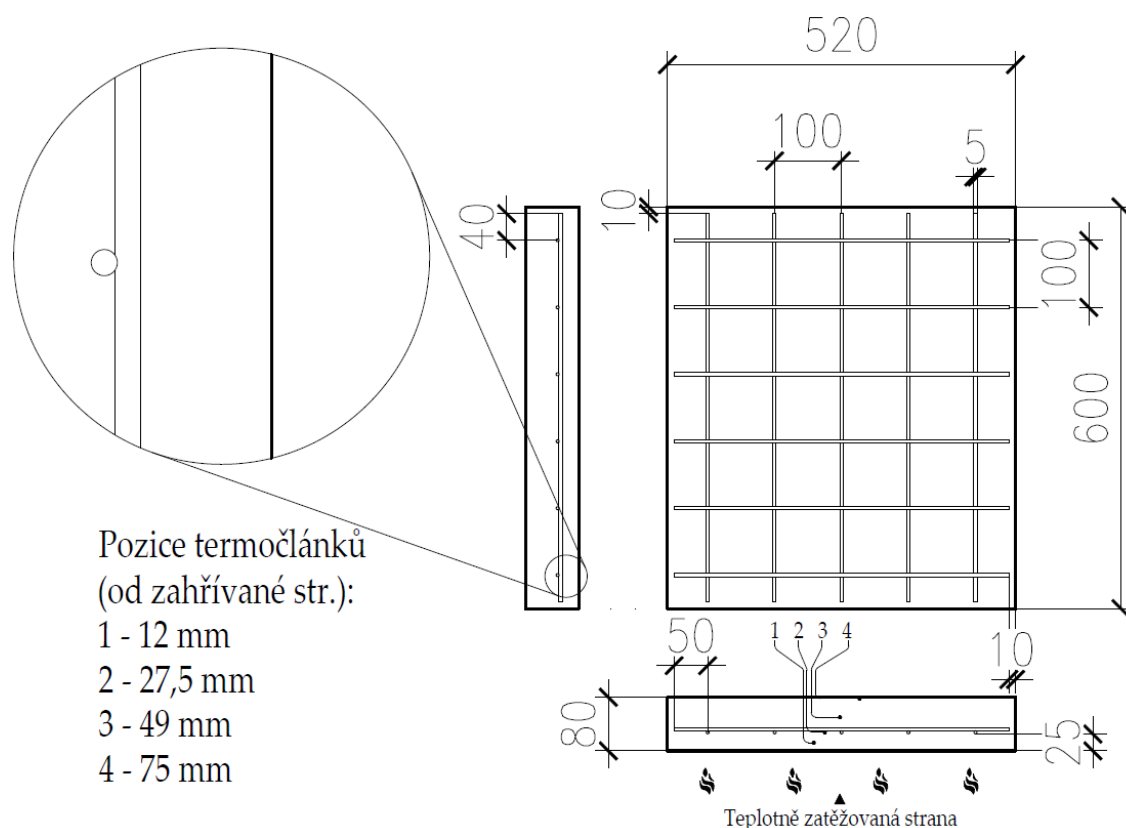
Pro tento účel byl navržen experiment, který zahrnuje několik prvků, které přibližují celé měření reálné situaci. Byla navržena betonová deska jednoduše vyztužená kari sítí, která byla následně lokálně vystavena zdroji vysoké teploty. Tímto způsobem byl vytvořen gradient poškození uvnitř desky. Cílem následujícího testování bylo ověřit schopnost jednotlivých akustických metod detekovat takto vytvořené poškození a navrhnout vhodný postup měření, programové zpracování měřených dat a zvolit vhodný interpretační postup.

4.3.1 Návrh zkušební desky

Pro účel tohoto testování byla navržena železobetonová deska o rozměrech 600×520×80 mm z receptury B testované v kapitole 4.2 Testy na prostém betonu. Deska byla vyztužena kari sítí 100/100/5 mm s krycí vrstvou 25 mm. Popis desky je uveden na Obr. 90. Kari síť byla zvolena s předpokladem, že právě tento typ minimálně ovlivní statické parametry a bezpečně dovolí další úpravu desky po výpalu. V desce byly zabudovány termočlánky typu K ve čtyřech rovinách.

Termočlánky typu K jsou slitinou NiCr-NiAl, které lze použít v teplotním rozsahu 270 °C až 1370 °C. Každý termočlánekový drát byl umístěn v rovině 80 mm v horizontální poloze pro snahu postihnout danou izotermu vzhledem k plošnému zdroji tepla [112]. Zkušební deska byla dále vybavena manipulačními oky pro snadné uchycení nad pecí.

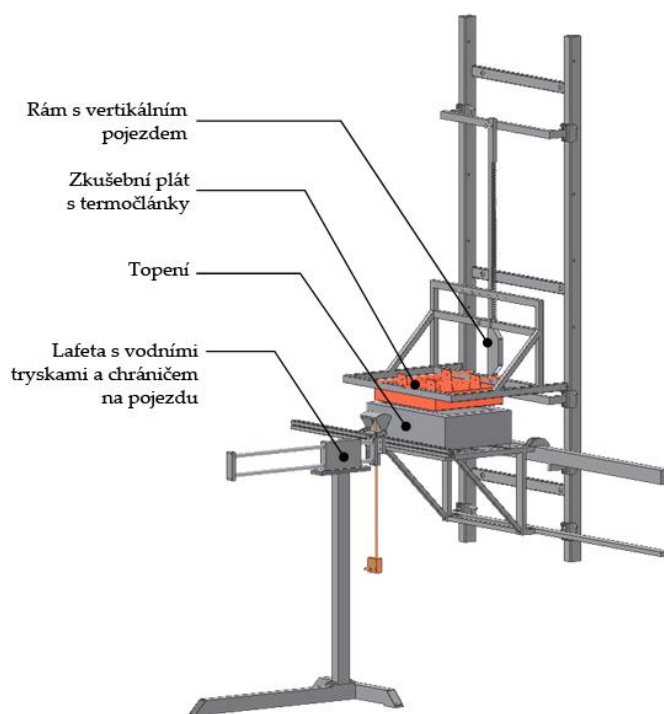
⁹ Pro hutný železobeton se běžně uvádí rozpětí $\lambda_m = 1,43\text{--}1,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$



Obr. 90: Schéma navrženého ŽB prvku

Testování zkušební desky proběhlo před výpalem a po výpalu dle zkušebního postupu popsáního na Obr. 17. Samotný výpal proběhl ve spolupráci s Fakultou Strojní a jejich Laboratoří přenosu tepla [63]. Deska byla upnuta na posuvný rám zkušební lavice, a ze spodní ohřívání strany zaizolována vysokoteplotní izolační hmotou SIBRAL s vyříznutým okénkem 100×100 mm. Ze spodní strany byla poté postupně zahřívána pomocí pece s odporovými spirálami.

V průběhu výpalu byl zaznamenáván vývoj teplot v čase, který zpětně posloužil při interpretaci NDT testování. K desce byl před samotným výpalem připojen vlnovod z neohřívání strany desky, který umožnil měření metodou akustické emise v průběhu výpalu. Kromě tohoto snímače AE byl k neohřívání povrchu desky přilepen i druhý AE snímač. Piezoelektrické snímače mají jistou tepelnou toleranci. Vrchol navrhované teplotní křivky, by měl dle odhadů nastat okolo teploty 200 °C na povrchu desky. Tato teplota může poškodit klasické piezoelektrické snímače pro akustickou emisi. Právě proto byly použity dva snímače, aby v případě poruchy u přímo nalepeného snímače zůstal funkční aspoň snímač našroubovaný na vlnovodu.



Obr. 91: Zkušební lavice Laboratoře přenosu tepla a proudění [63].

Výpal desky byl nastaven dle normové křivky ISO 834 [113], kde referenční teplota byla snímána uvnitř pece. Výkon pece (a její klasická pracovní oblast) jsou však stavěny na podstatně vyšší teploty a rychlejší náběh. Pro účel tohoto měření byl výkon pece atypicky omezen, což vedlo k nedokonalému kopírování ISO křivky.

Záměrem bylo vytvořit teplotní gradient v objemu tělesa tak, aby bylo v desce detekováno přítomné poškození betonu vysokou teplotou okolo 200–1200 °C, ale současně aby se tam vyskytovaly i téměř teplotně nezátížené části.

Tímto způsobem bylo v rámci jednoho celistvého zkušebního tělesa možné vyrobit celé spektrum testovaného teplotně degradovaného betonu, které již bylo otestováno v kapitole 4.2 Testy na prostém betonu.

4.3.2 Výroba zkušební desky

Pro zkušební desku byla vybrána receptura B, díky své relativní stabilitě co do rozptylu měřených hodnot, a to jak nedestruktivními, tak destruktivními metodami napříč všech zatěžovacích teplot. Zároveň se tato receptura co do použitých frakcí kameniva nejvíce blíží konvenčně využívaným betonovým směsím. Výsledná deska vážila v týden starém stavu 58 kg.

Na Obr. 92-Obr. 95 jsou znázorněny jednotlivé etapy výroby zkušební desky od přípravy bednění, výztužné sítě a termočlánků přes plnění ČB až po odbedněný stav zkušební desky připravený do vodního uložení.



Obr. 92: Příprava KARI sítě s termočlánky a distančními podložkami ve formě



Obr. 93: Plnění formy ČB

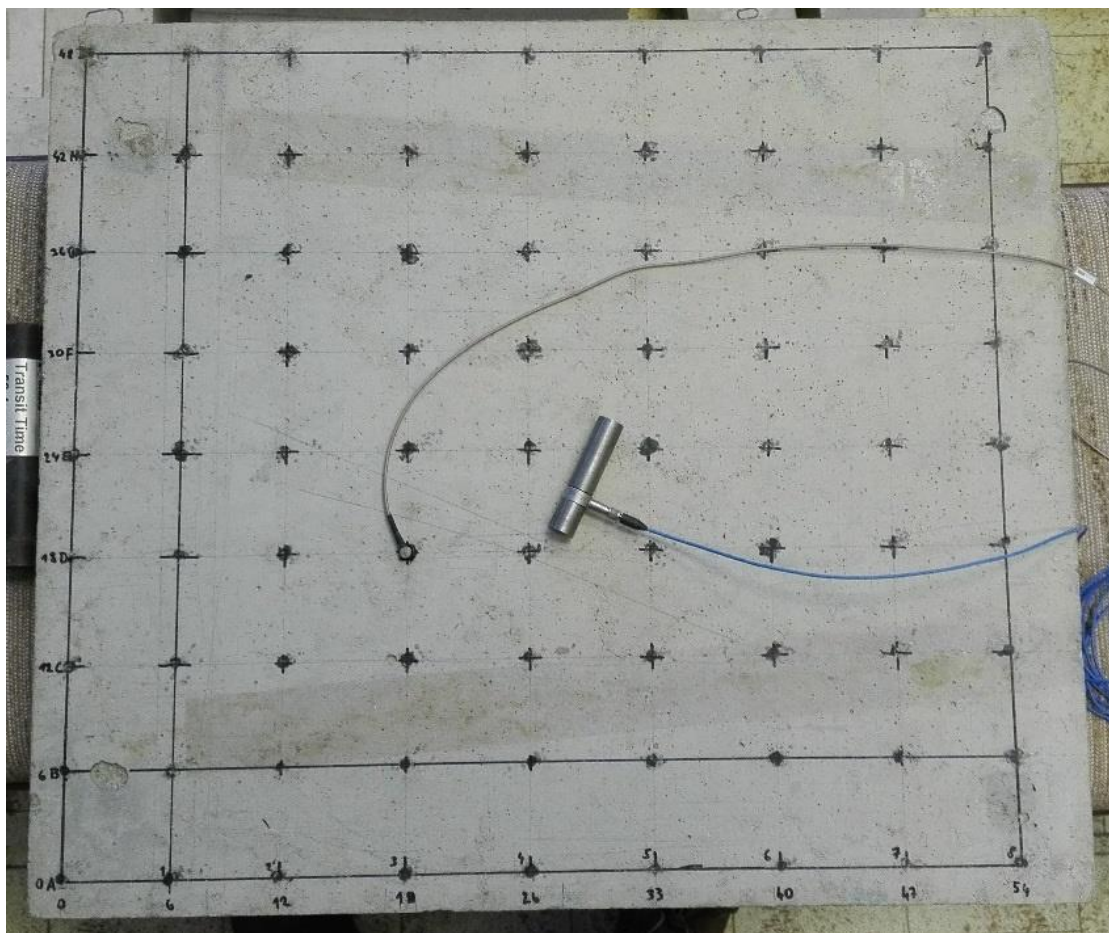


Obr. 94: Výsledná ŽB deska



Obr. 95: Výsledná ŽB deska, strana od bednění

Deska byla uložena v polyethylenovém pytli naplněném vodou na dřevěných distančních podložkách o tloušťce 15 mm po dobu 28 dní. Poté byla přenesena do zkušební laboratoře a ponechána k částečnému vyschnutí po dobu dvou týdnů. Poté proběhlo prvotní měření nedegradovaného referenčního stavu.



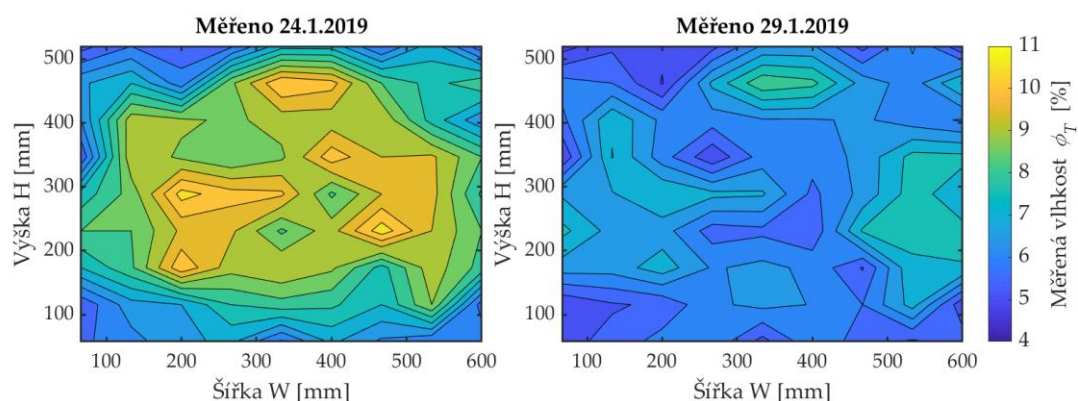
Obr. 96: Uspořádání zkušebních bodů desky pro testování dle metodiky znázorněné na schématu Obr. 55

Zkušební deska byla rozdělena do čtvercové zkušební sítě 9×9 bodů, ve kterých byla pomocí jednotlivých NDT metod testována dle schématu na Obr. 17. Zkušební rastr je vyobrazen na Obr. 96. Krajiní hrany sítě jsou minimálně 2 cm vzdálené od jednotlivých hran desky, což je v souladu s doporučeními pro testování metodou IE.

4.3.3 Průběh experimentu

Připravená deska byla po testování NDT metodami převezena na Fakultu strojní do Laboratoře přenosu tepla, kde byla upnuta nad pecí. Obr. 98 popisuje usazení zkušební desky na pojezdném rámu zkušební lavice. Deska byla ponechána dva dny nad pecí nastavenou na 100 °C, aby byl zajištěn nízký obsah volné vody. Stav vlhkosti v desce byl otestován vlhkostní sondou TESTO. Plošná vlhkost před a po sušení nad pecí je zobrazena na Obr. 97. Měření proběhlo ve všech 81 bodech desky. Uvedený graf tak zobrazuje v ose x a y souřadnice bodů a v ose z měřenou vlhkost ϕ_T .

K tomuto měření byla využita vlhkostní kalibrace v kapitole 4.1.2. Dle této kalibrace lze odhadnout množství zbytkové vlhkosti ve zkušební desce. Jakmile všechny hodnoty měřené vlhkosti ϕ_T nepřevyšovaly 7 % (které jsou ekvivalentní 2% hmotnostní vlhkosti u) byla zahájena příprava měření pro řízenou tepelnou degradaci.



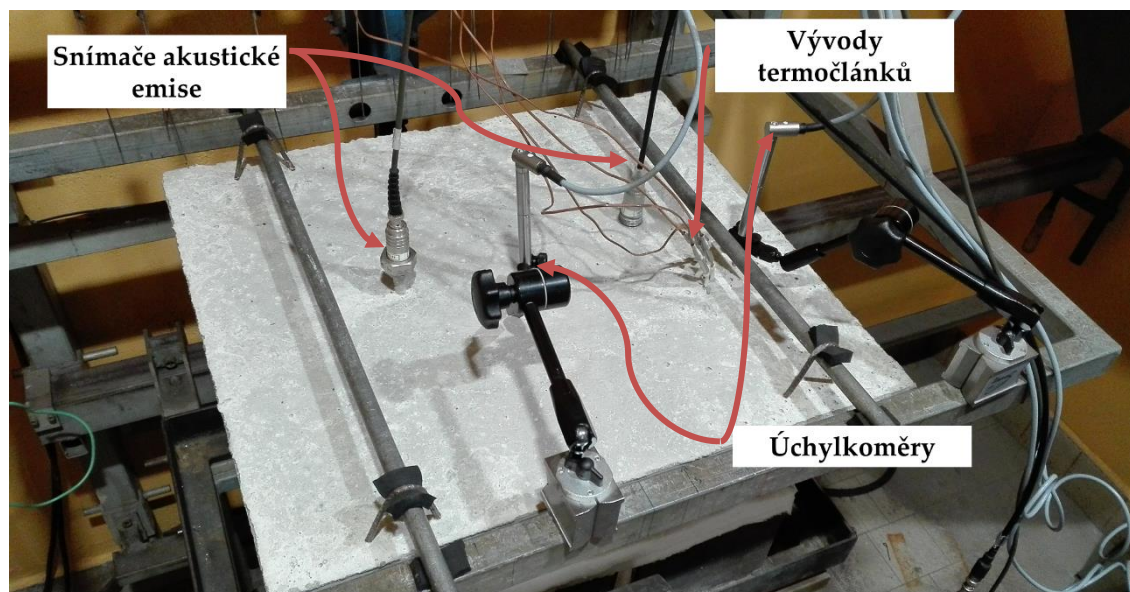
Obr. 97: Měření vlhkosti desky pomocí sondy TESTO před a po sušení



Obr. 98: Upnutí ŽB desky ve zkušební lavici Laboratoře přenosu tepla a proudění a uspořádání měřicí techniky u zkušební lavice

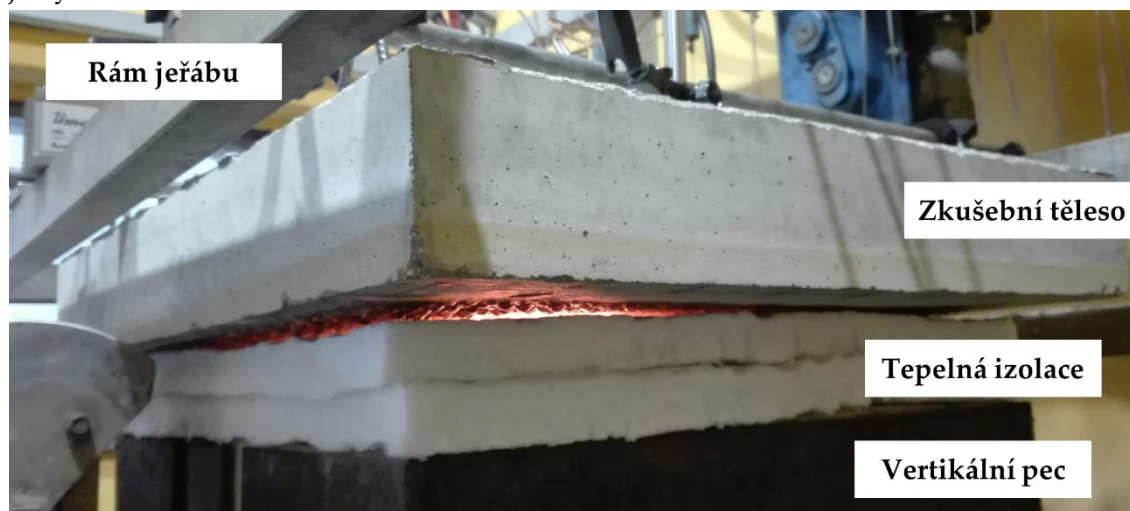
V rámci přípravy měření byla zkušební deska osazena dvěma snímači akustické emise a dvěma kapacitními úchylkoměry.

Pro záznam průhybu desky byly využity kapacitní úchylkoměry a záznamová karta Quantum. Frekvence záznamu byla nastavena na 7 Hz, čímž bylo zajištěno vytvoření plynulé křivky deformace i v situaci, kdy dojde například k prasknutí, rozlomení či jiné rychlé deformaci desky. Oba úchylkoměry byly upnuty do magnetických držáků, které byly připevněny magnety k rámu zkušební lavice.



Obr. 99: Detail umístění snímačů v průběhu výpalu

Akustická emise byla v průběhu výpalu snímána dvěma snímači umístěnými uprostřed každé z polovin zkušební desky. První snímač byl umístěn na kónickém vlnovodu zapuštěném 40 mm hluboko v desce. Druhý snímač akustické emise byl přilepen přímo na povrch desky pomocí sekundového lepidla. Detail tohoto uspořádání je vyobrazen na Obr. 99.

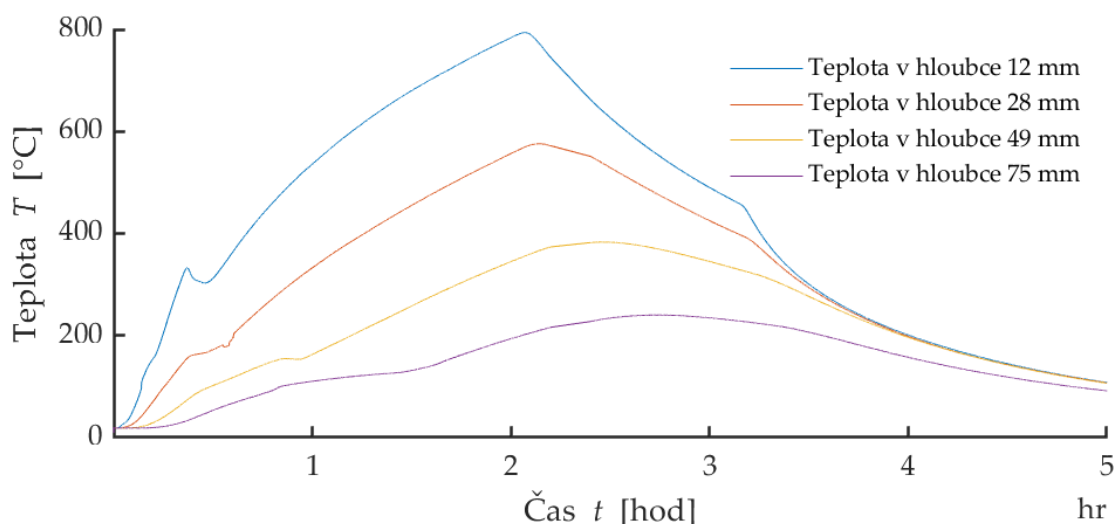


Obr. 100: Uspořádání izolace, pece a zkušebního tělesa

Ohřívaná strana desky byla zaizolována dvěma deskami z minerální tepelně izolační vlny SIBRAL s vyřezaným čtvercem o rozměrech 100×100 mm. Tímto byl zajištěn tepelný příkon v desce pouze v omezeném rozsahu přesně uprostřed desky.

V první fázi výpalu bylo potřeba ověřit, že se v nastaveném teplotním nárůstu nepoškozuje deska způsobem, který by znemožnil další pokračování měření – například kdyby praskla v celém průřezu, nebo pokud by se projevil nějaký stupeň odprýskávání.

Na Obr. 101 je znázorněn záznam teplot ze všech 4 termočlánků uvnitř desky nad teplotně zatěžovanou plochou. Právě první „zub“ se objevil po přibližně 30 minutách experimentu, kdy proběhla kontrola povrchu desky.



Obr. 101: Průběh teplot v jednotlivých termočláncích

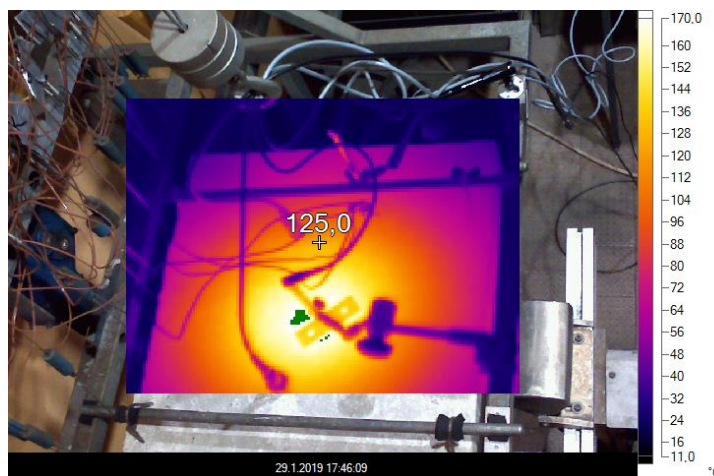
Obr. 102 dokumentuje kondenzaci vody na ohřívané straně desky blíže ke krajům. Kromě této kondenzace se neprojevila žádná další známka poškození. Průhyb na desce byl stále přibližně lineární bez výrazných skoků, které by mohly signalizovat strukturní poškození typu vzniku praskliny, odlomení apod.



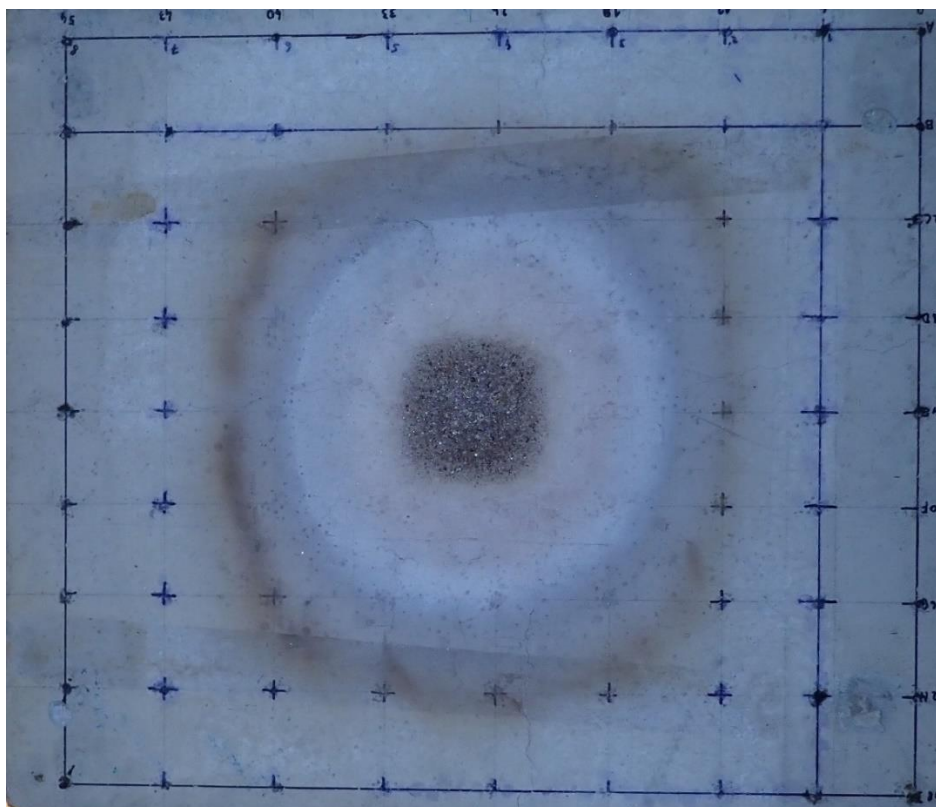
Obr. 102: Kondenzace vody na tepelně zatěžované části desky

Zahřívání od tohoto bodu pokračovalo plynule až do vypnutí pece, odstavení a zchlazení desky atmosférickým vzduchem. Vývoj teplot uvnitř desky dokumentuje teplotní posun vzhledem k hloubce zabudovaných termočlánků.

Vývoj teplot na vnějším povrchu byl v průběhu dokumentován jak optickou kamerou, tak termografickým snímkováním. Příklad rozložení teplot dokumentuje Obr. 103, na kterém jde vidět, že rozložení teplot okolo zdroje tepelného záření je kruhové a lze tedy předpokládat, že i teplotní rozložení uvnitř objemu tělesa má sférický charakter.



Obr. 103: Sférické rozložení teploty uvnitř teplotně zatěžované desky



Obr. 104 Povrch desky po vystavení vysoké teplotě

Po odstavení desky proběhla první vizuální dokumentace vzniklého poškození desky. Rozložení teplotního poškození lze rozpoznat už na základě změny barvy [18; 2], a právě Obr. 104 dokumentuje zástupce jednotlivých teplotně degradačních stavů betonu. Obrázek povrchu ukazuje sférické kruhy různě zbarveného betonu, který přechází z šedomodré barvy přes šedou, bílou, okrovou až hnědou barvu, která koresponduje se záznamy poškození betonu teplotami 1200 °C a vyšší.

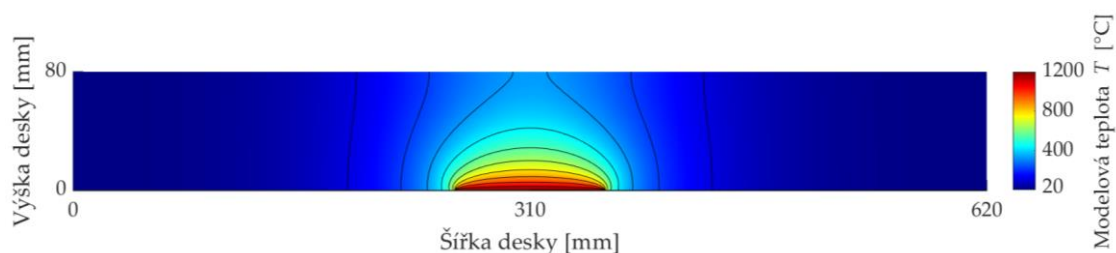
Právě toto prvotní posouzení dokazuje, že části vyrobené desky jsou opravdu poškozené teplotami od 200 až po 1200 °C, které byly tématem měření v celé kapitole 4.2 Testy na prostém betonu.

4.3.4 Testování desky pomocí Impact-Echo metody

Při testování teplotně degradovaného zkušební tělesa z prostého betonu pomocí NDT metod dochází ke snižování měřených veličin v závislosti na teplotě degradace. V průběhu vystavení reálné železobetonové konstrukce zvýšené dochází k částečné degradaci, kdy v závislosti na maximální dosažené teplotě a délce vystavení těmto teplotám jsou různě intenzivně přítomné všechny složky teplotně degradovaného betonu tak, jak byly definovány v kapitole 4.2 Testy na prostém betonu.

Toto rozložení teplot v objemu konstrukce lze ilustrativně znázornit na zkušební desce znázorněné na Obr. 105. Jedná se o řez deskou a modelové rozložení teplot v desce v čase 2:10 hod experimentu. Pro výpočet byly použity materiálové parametry uvedené v Tab. 14. Jedná se o modelové znázornění rozložení teplot, které se od reálné situace liší, ale při srovnání s reálně měřenými teplotami v jednotlivých hloubkách se jedná o relativně přesný model a pro ilustrativní účel je tedy postačující.

Lze z něj vytušit pravděpodobné rozložení teplotního poškození, kde například část materiálu degradovaná teplotou 1200 °C bude pouze v lokální relativně tenké vrstvě uprostřed desky. Naopak teplotní degradace od 200 do 600 °C je dominantní po krajích a na druhé straně desky.



Obr. 105: Model rozložení teplot v čase 2:10 experimentu

Je tedy zřejmé, že v jednotlivých bodech desky se vyskytuje několik typů teplotního poškození záraz, a to o různé intenzitě. Zatímco na krajích desky bude převážně beton ve vysušeném téměř referenčním stavu jako byl před tepelnou degradací, uprostřed bude hmota betonu tvořena všemi teplotně degradovanými složkami betonu od 200 do 1200 °C.

Tab. 14: Nastavené parametry modelu přestupu tepla

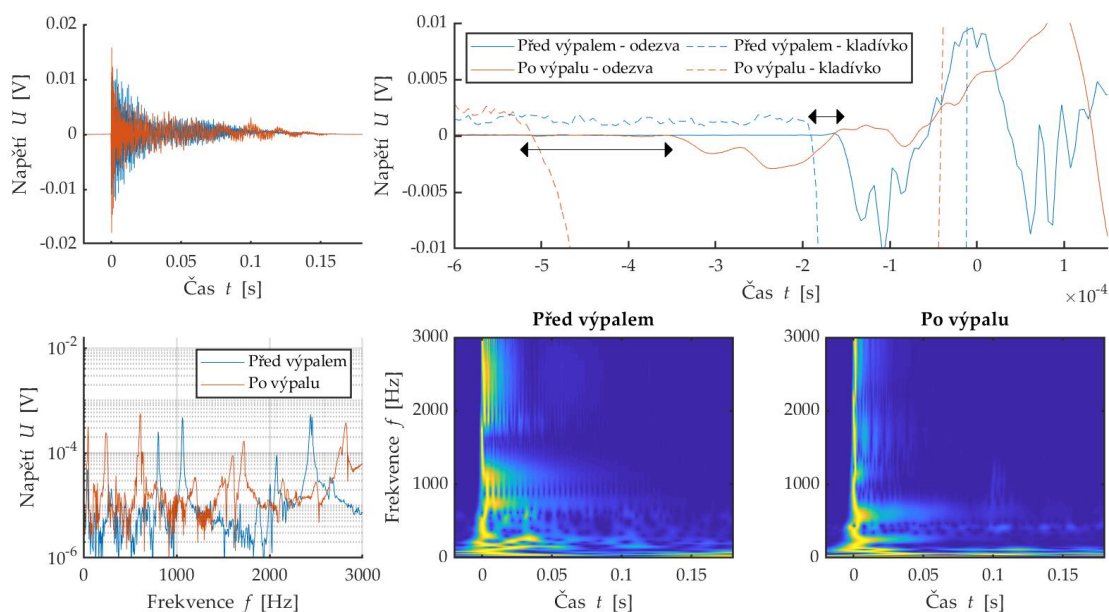
Objemová hmotnost D	Okolní teplota $T_{a,1}$	Emisivita ε	Měrná tepelná kapacita C	Součinitel tepelné vodivosti λ_m
[kg/m ³]	[°C]	[-]	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
2350	25	0,89	1020	1,659

Pokud bychom chtěli použít standardní postupy a metodiky v normách ČSN 73 1372 [47] nebo dle metodiky metody Impact-Echo, bude informace měřená z jednotlivých bodů příliš komplexní na standardní rozlišovací schopnost této metody.

Množství informací získaných při testování jednoho měřicího bodu lze ilustrovat pomocí Obr. 106. Jedná se o srovnání měření pomocí IE sestavy prostředního bodu desky čili 5. řádek, 5. sloupec. Levý horní graf znázorňuje signál před (modrá) a po degradaci (červená). Pravý horní graf znázorňuje zvětšení začátku obou signálů, který dokumentuje rozdíl v čase signálu ze zabudovaného snímače v kladívku a snímače připevněného na pozici 5. řádek a 6. sloupec, a to před výpalem i po výpalu. Tato část

tedy znázorňuje rychlost povrchových vln na desce. Toto posouzení se vybízí, poněvadž nejvíce degradovaná je právě krycí vrstva desky. Výrazná změna v rychlosti povrchové vlny tedy může indikovat přítomnost teplotního poškození.

Následující graf na Obr. 106 vlevo dole popisuje frekvenční spektrum v daném místě měření před a po výpalu. Po počátečních testech byla stanovena jako klíčová oblast měřené frekvence oblast 0-3000 Hz. Tuto oblast lze též stanovit pomocí vzorce (10), kterým můžeme odhadnout rezonanční frekvenci při známé tloušťce, objemové hmotnosti desky a rychlosti P vlny. V tomto případě tedy vychází hodnota spočtené frekvence na 2615 Hz pro referenční nedegradovaný stav.



Obr. 106: Zobrazení měřených veličin a jejich interpretace pomocí analýzy signálu, frekvenčního spektra a skalogramu signálu před a po degradaci na měřící pozici desky R5S5 (5 řádek a 5 sloupec ve zkušební matici)

Při pohledu na skalogram signálu odezvy desky před výpalem v oblasti 2400-2600 Hz je skutečně přítomná výrazná magnituda, která může korespondovat s materiálovými vlastnostmi desky, nicméně je zde několik dalších frekvenčních oblastí s podstatně vyšší magnitudou, která déle přetrvává v čase signálu.

Z těchto výsledků lze zmínit dominantní frekvence 299, 599, 1063 2077 a 2441 Hz pro referenční nedegradovaný stav prostřední oblasti desky. Frekvence, které napříč měřicí sítí přetrvávají téměř ve všech bodech, jsou pak frekvence 599, 1063 a 2077 a 2436 Hz. Jedná se o dílčí frekvence jednotlivých vibračních módů desky.

Pokud srovnáme tyto dílčí dominantní frekvence v referenčním stavu a po výpalu, zpozorujeme nápadný posun dominantní frekvencí do nižší frekvenční oblasti. U tohoto posunu se však nelze zaměřit pouze na první dominantní frekvenci, která v některých případech vůbec nekoresponduje s reálným fyzikálně-mechanickým stavem desky. Je proto potřeba porovnat více frekvenčních módů mezi sebou, a vybrat vhodnou rezonanční frekvenci.

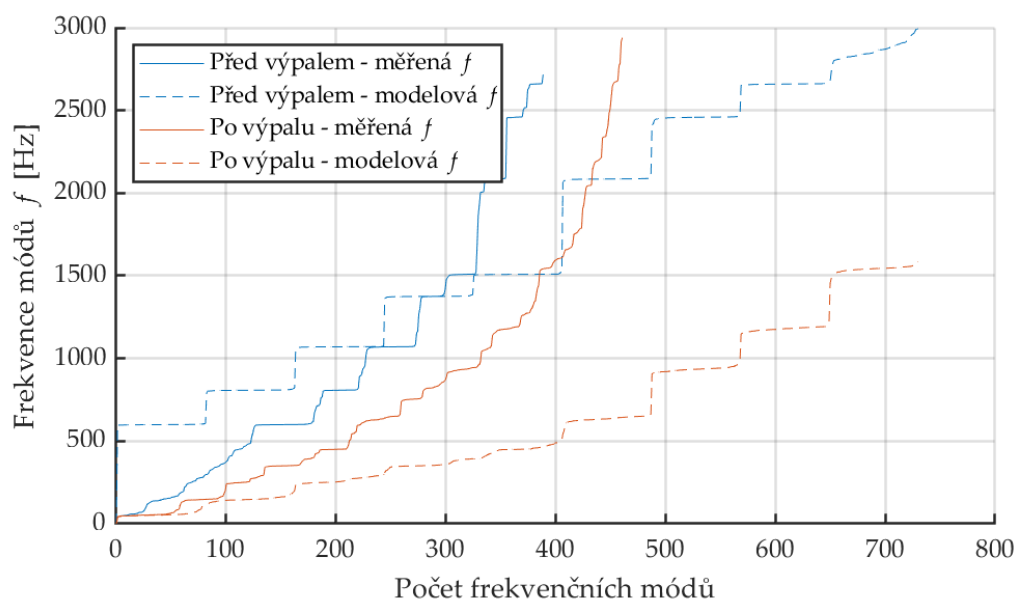
Tento úkol lze provádět ručně, kdy lze projít každý měřený bod, stanovit rychlost šíření povrchové vlny, a sledovat prvních pět dominantních frekvencí. Poté mezi sebou

porovnat měřené frekvence a hledat závislost mezi rozložením teploty a změnou měřené frekvence¹⁰.

4.3.5 Modální analýza desky

Stabilní frekvence desky jako celku lze označit za frekvenční mód, kdy konkrétní frekvenci desky lze změřit ve všech bodech. Toto měření, které proběhlo dle schématu znázorněném na Obr. 53, bylo schopné podat rozložení vlastních stabilních frekvencí desky, a to ve stavu před a po výpalu. Při tomto měření byl snímač odezvy desky fixně připevněn v levém horním rohu desky, a postupně byl třemi údery buzen každý bod z měřicí sítě. Modální analýza slouží ke stanovení stabilních frekvenčních módů různých konstrukcí pomocí funkce FRF. Součástí tohoto procesu je i odhad vlastních stabilních frekvencí.

Jedná se o analytické posouzení frekvenčního spektra FRF, kde jsou odhadovány stabilní frekvence pomocí metody špička-amplituda [97]. Tyto odhadnuté vlastní frekvence jsou poté znovu použity pro vytvoření modelu, který aproximuje FRF měřenou funkcí. Jak již bylo zmíněno v části 3.3.4 Funkce frekvenční odezvy, měřená FRF může trpět přítomným šumem na snímači odezvy či na snímači kladívka, proto se vytváří aproximační funkce, která výslednou FRF vyhlazuje. Pokud znovu srovnáme odhad vlastních frekvencí, po provedení aproximace dostaneme čistější odhad vlastních stabilních frekvencí. Odhad vlastních měřených a modelových frekvencí srovnaných dle velikosti je znázorněn na Obr. 107. Z tohoto grafu jsou jasně rozpoznatelné stabilní frekvence modelové aproximační funkce. Jedná se o výrazné vodorovné frekvenční oblasti, které jsou přítomné jak před, tak po teplotní degradaci.



Obr. 107: Srovnání všech detekovaných vlastních frekvencí celé zkušební desky a jejich modelová aproximační funkce před a po výpalu

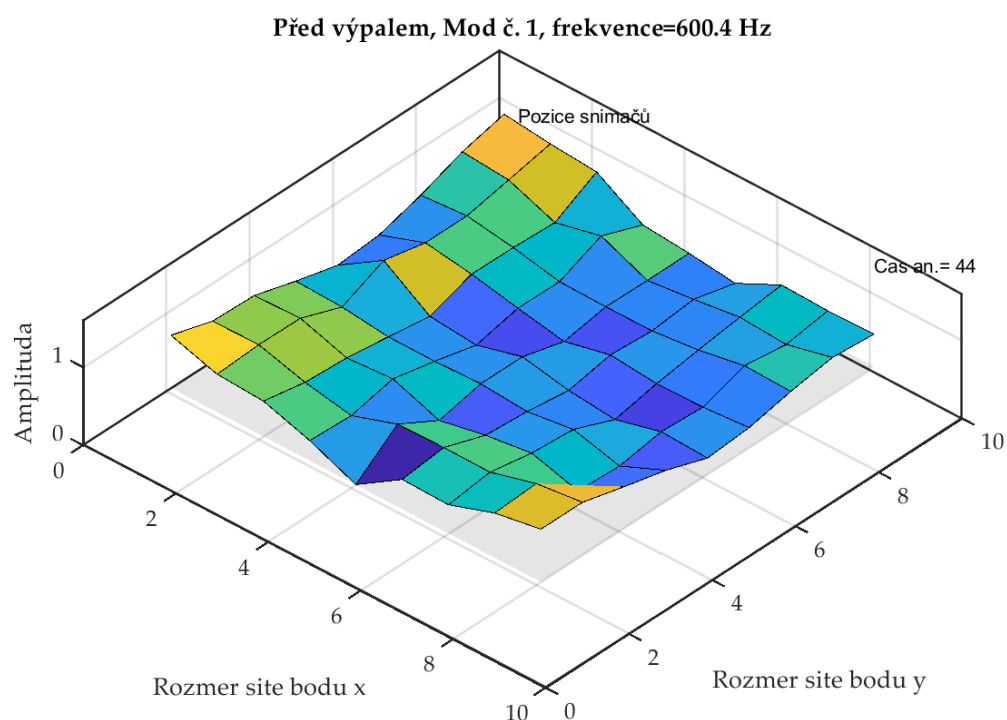
¹⁰ Tento postup je mimo jiné znázorněn na Obr. 55 v kapitole 4.1.5 Typy testování plošného prvku.

Výstup tohoto měření tak můžeme znázornit vlastními frekvencemi jednotlivých módů a jejich frekvenčním útlumem v Tab. 15. První vlastní frekvence desky v referenčním stavu je 599 Hz s útlumem 0,007 %. Tato frekvence se shoduje i s frekvencemi, které byly v některých bodech desky měřené pomocí metodou IE, podobně tomu je i u ostatních frekvenčních módů. První frekvenční mód je dále znázorněn na Obr. 108, kdy osa z znázorňuje relativní výchylku jednotlivých bodů desky prvního frekvenčního módu.

Tab. 15: Vlastní frekvence a útlum pro desku před a po tepelné degradaci

Č. módu	Před výpalem		Po výpalu	
	Frekvence f [Hz]	Útlum ζ [%]	Frekvence f [Hz]	Útlum ζ [%]
1	599	0,007362	62	0,181706
2	807	0,007207	167	0,167947
3	1070	0,005464	287	0,075975
4	1374	0,004671	350	0,060348
5	1507	0,004871	444	0,060348
6	2084	0,004333	625	0,024828

Stav po výpalu je mírně odlišný a první vlastní frekvence byla detekována již při 62 Hz s relativním útlumem 0,18 %. Tato frekvence nebyla detekována ani při měření. Podobně tomu je i pro druhý vlastní mód s frekvencí 167 Hz a vlastním útlumem 0,16 %.



Obr. 108: Deformační mód první stabilní rezonanční frekvence desky

V této fázi interpretace měřených dat pomocí modální analýzy je důležité zahrnout pravděpodobný fyzikálně mechanický stav desky. Při teplotní lokální degradaci dochází k postupnému snižování fyzikálně mechanických vlastností, jako je pevnost, akustická impedance, vlastní rezonanční frekvence či rychlost šíření zvuku v materiálu. Zároveň dochází ke zvyšování porozity a nasákavosti a beton je vysokou teplotou dále dosušován. Nemalý vliv mají na integritu kompozitu i vznikající tlaky vodní páry, které mohou dále i na mikroskopické úrovni způsobovat mikrotrhliny.

Celá konstrukce desky je tedy v nejvíce zasažených oblastech tvořena částmi, které mají jiné akusticky tlumivé vlastnosti a modální analýza není zcela stavěná na popis takového stavu, kdy se vlastnosti materiálu v objemu mění.

Nicméně právě díky znalosti vlastních módů před a po výpalu a jejich útlumu, můžeme rozhodnout, které vlastní frekvence jsou významné (které mají nízký útlum) a které jsou méně důležité (které mají vysoký útlum). Tato znalost dále usnadňuje orientaci mezi jednotlivými frekvencemi.

4.3.6 Vyhodnocení akustického testování

Měření desky pomocí metody IE proběhlo dle schématu znázorněného na Obr. 55 a poskytuje hned dvojí způsob interpretace měřených dat. První postup můžeme označit za ruční vyhodnocení, kdy každý signál odezvy před a po výpalu posuzujeme samostatně, a ručně vybíráme dominantní frekvence pro srovnávání. Součástí tohoto procesu je zároveň odečítání rozdílu v časech signálu snímače a budiče v každé měřící dvojici bodů ve stavu referenčním i degradovaném. Tento typ interpretace je ze všech nejjednodušší a zároveň nevyžaduje složité posuzování se zahrnutím dat z modální analýzy. Pro zpracování frekvenčního spektra se využívá pouze signál ze snímače, a výsledné spektrum je tedy mírně odlišné ve srovnání s FRF.

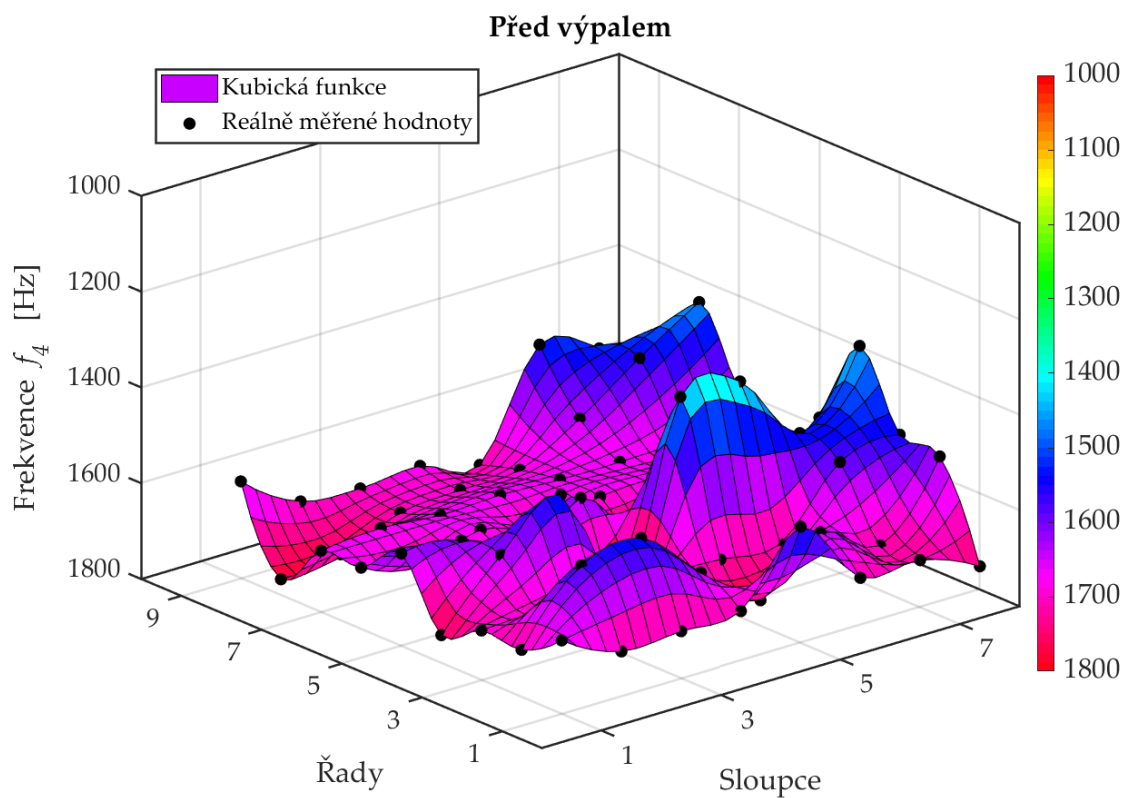
Druhý typ interpretace je pomocí pseudo-modální analýzy, kdy z každého signálu budiče a snímače je zpracována FRF a jsou odhadnuty vlastní frekvence. Tento postup je jednodušší a do jisté míry automatizovaný. Z pozice uživatele není potřeba ručně procházet všechna měřená frekvenční spektra, a je pouze potřeba rozhodnout, kterou frekvenční oblast je třeba znázornit a následně interpretovat.

4.3.6.1 Standartní vyhodnocení IE

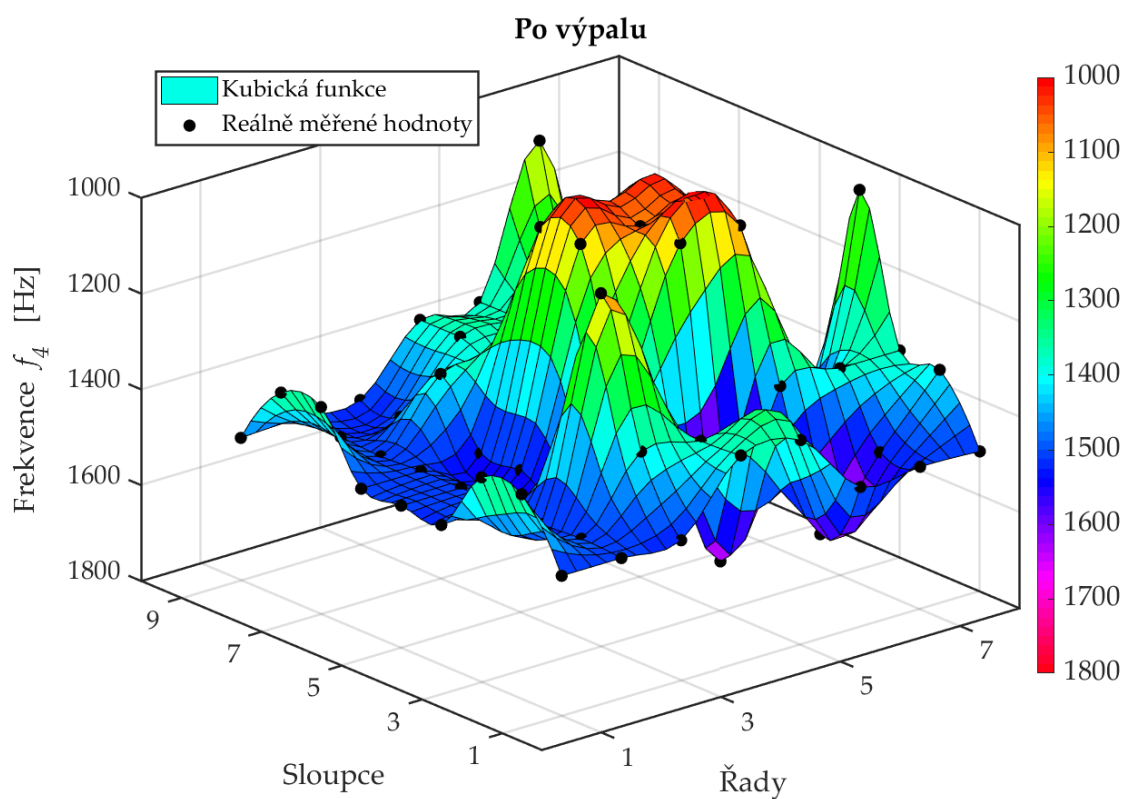
Při ručním vyhodnocení je analyzována frekvenční oblast jak pomocí FFT, tak pomocí CWT, a hledá se vlastní frekvence, která nejlépe koresponduje s fyzikálně mechanickým stavem desky. Tento postup je analogický i pro klasickou interpretaci měření pomocí IE. Jedná se o do jisté míry o subjektivní proces, kdy různí lidé mohou mít odlišný názor na to, které frekvence vybrat jako dominantní. Díky tomuto faktu je ruční vyhodnocení zatížené jistou neobjektivitou při interpretaci.

Z jednotlivých měřících bodů bylo vybráno vždy prvních 5 vlastních dominantních frekvencí, které byly následně aproximovány kubickou funkcí pro znázornění změny frekvence ve stavu před a po tepelné degradaci.

Rozložení výsledně zvolené 4. frekvence f_4 je znázorněno na Obr. 109-Obr. 110. Kromě kubické funkce jsou zde znázorněny i reálně měřené frekvence, které jsou vyznačeny černými tečkami.



Obr. 109: Srovnání sledované frekvence f_4 před výpalem desky



Obr. 110: Srovnání sledované frekvence f_4 po výpalu desky

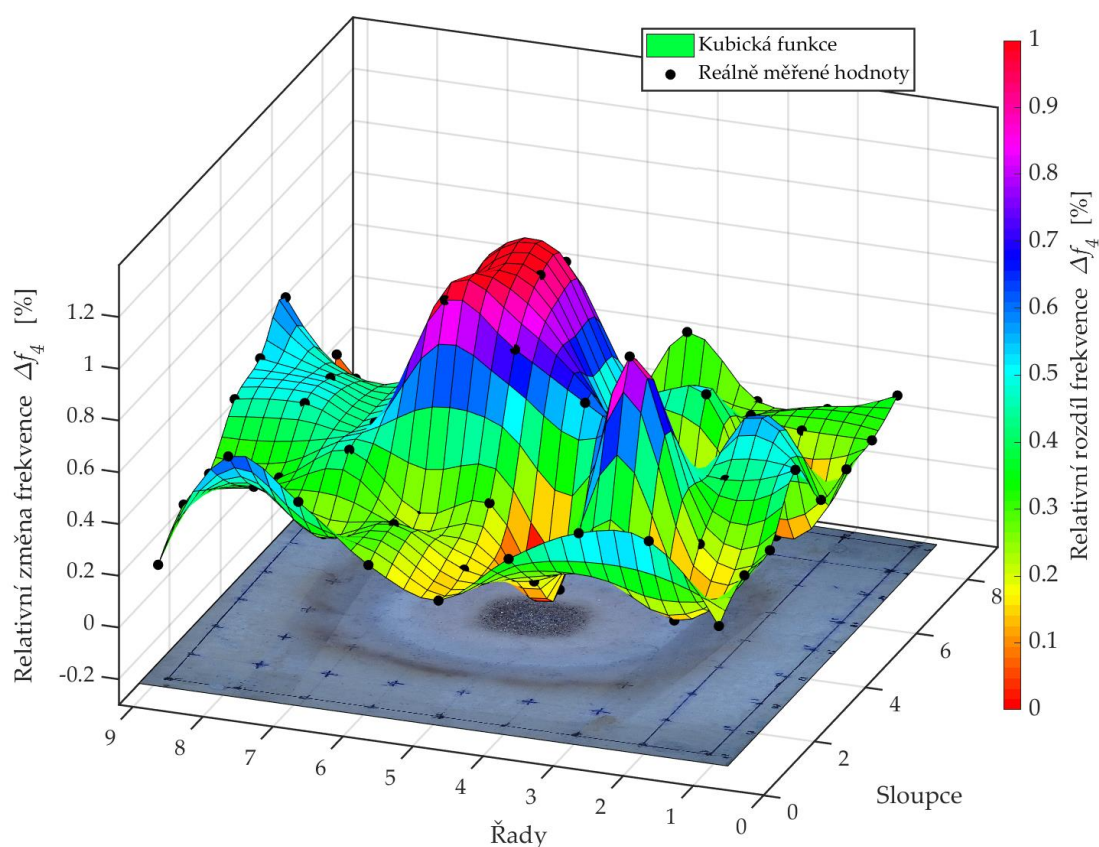
Ze zpracované roviny před a po výpalu lze rozpoznat frekvenční charakter před a po výpalu. Plastická rovina kubické aproximační funkce je obarvena v rozptylu od 1000-1800 Hz. Osa z je zde převrácena, protože s rostoucí teplotní degradací dochází k poklesu měřené rezonanční frekvence. Chybějící oblast mezi 8. a 9. sloupcem je zapříčiněna charakterem testování, kdy v tomto posledním sloupci byl umístěn snímač a úder kladívka byl veden do bodu č. 8.

Na první pohled jde rozpoznat tvar sopky v grafu znázorňující stav po výpalu. Pokud uděláme řez touto prostřední řadou dostaneme tvar funkce znázorněný na Obr. 112. Kromě tohoto výrazného poklesu jsou přítomny další nižší poklesy ve frekvenci. V případě krajních poklesů pak prohlubně korespondují s přítomností prasklin po stranách desky, tyto praskliny vedou přes celou tloušťku desky. To znamená, že buď výrazný rozdíl v materiálových vlastnostech nebo přítomnost praskliny jakožto strukturního poškození, mohou vést k lokálnímu snížení vlastní rezonanční frekvence. Lokalizace trhlin je přitom jedna z disciplín, na které je metoda IE vhodná a často využívaná [114; 85; 115].

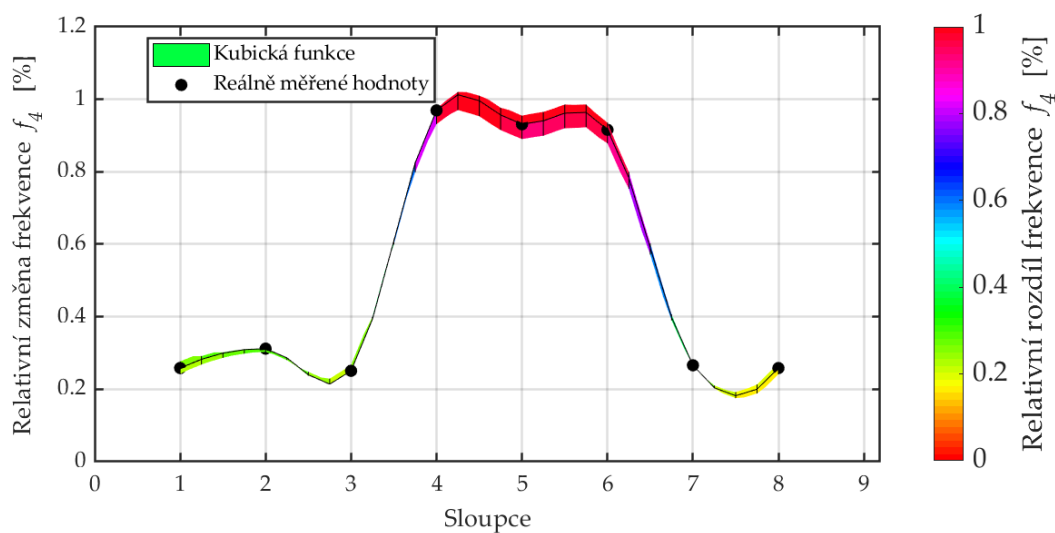
Ve stavu před degradací je přítomná výrazná prohlubeň v 5. řadě a 6. -7. sloupci, zde se pravděpodobně jedná o odraz mechanické vlny od zadní strany zabudovaného vlnovodu, který byl v desce zabudován pro účel akustické emise v průběhu výpalu. Vlnovod je opravdu v této oblasti desky přítomen z druhé teplotně neexponované strany.

Pokud se podíváme na začátek prohlubně měřené frekvence, je pokles tvořen výrazným skokem, což lze vysvětlit tím, že změna proběhla na podstatně menší oblasti, než jak velká byla zvolena měřící síť.

Při vyjádření rozdílu v měřené frekvenci před a po výpalu v relativním měřítku dostaneme podstatně srozumitelnější tvar kubické funkce, který je znázorněn na Obr. 111 společně s fotkou degradované desky umístěné pod grafem. Řez diagramu v řadě č. 6 je pak znázorněn na Obr. 112.



Obr. 111: Rozdíl ve frekvenci f_4 před a po výpalu v relativním měřítku



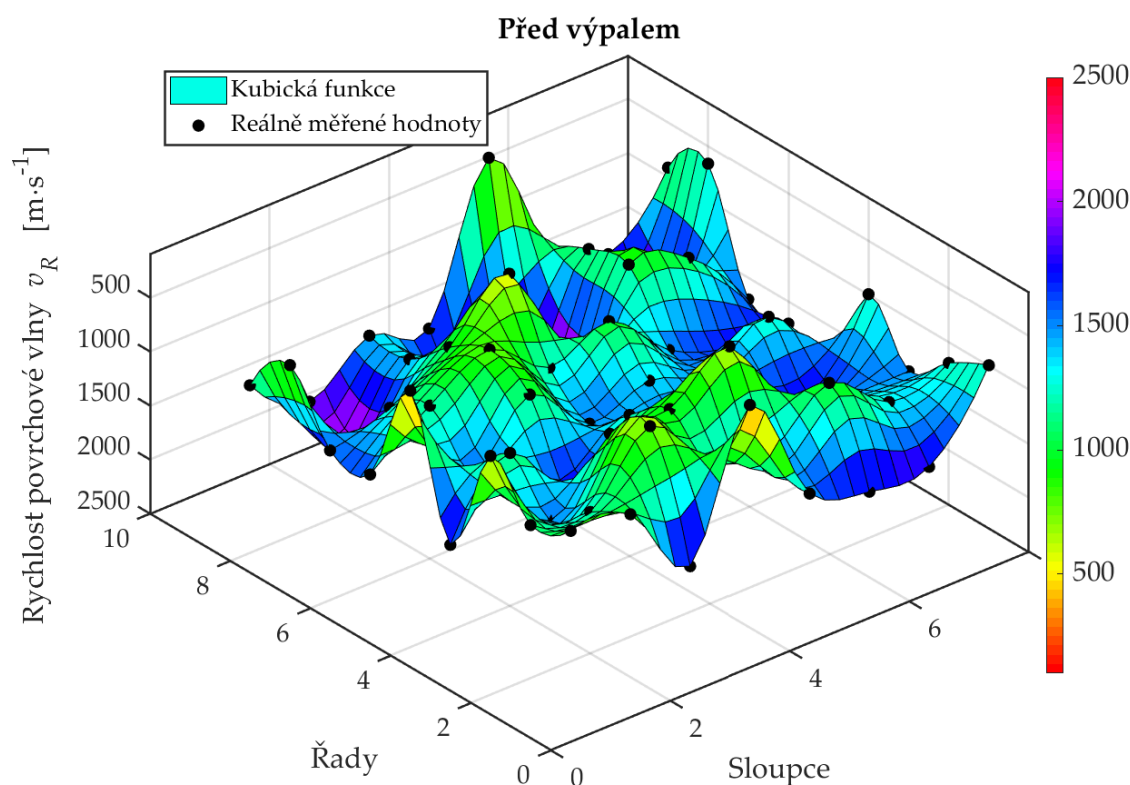
Obr. 112: Řez aproximační kubickou funkcí relativní změny frekvence v 6. řadě desky

Z grafů je patrné, že tvar sopky tvořený aproximační funkcí ze zvolených frekvencí f_4 , nápadně připomíná dva zrcadlové průběhy měřených veličin na Obr. 89 popsané v kapitole 4.2.4. Kromě trendu prostřední části grafu je detekována druhá výrazná relativní změna v 3. řadě a 2. sloupci. Z konstrukčního hlediska je tato oblast desky

stejná jako v ostatních bodech a je tedy pravděpodobné, že tato výrazná změna koresponduje s přítomností vnitřního defektu.

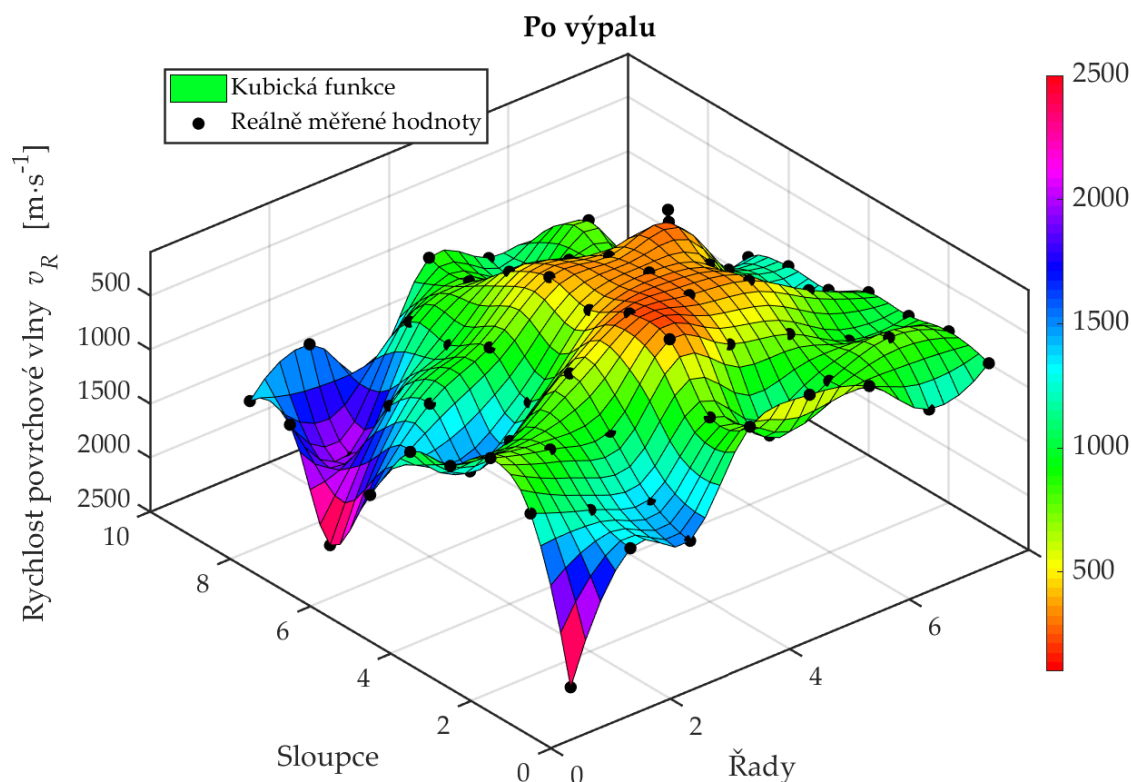
4.3.6.2 Rychlost povrchové vlny

Vzdálenost budiče a snímače byla při všech měřících bodech rovna 60 mm. Ze znalosti času signálů a vzdálenosti, kterou mechanická vlna urazí, lze spočítat rychlost povrchových vln v jednotlivých bodech. Tato rychlost povrchových vln v jednotlivých bodech měřící desky před a po výpalu je znázorněna na Obr. 113 a Obr. 114.



Obr. 113: Měření rychlosti povrchové vlny před výpalem desky

Rychlost povrchových vln v referenčním stavu ve všech bodech desky osciluje přibližně v rozmezí 1138-1462 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jedná se tedy o poměrně velký rozptyl, kde několik hodnot dosahuje maxima 1981 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a minima 496 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nelze říct, že by rozložení rychlosti korespondovalo s konstrukčními prvky desky či s materiálovými vlastnostmi. Ze znalosti rychlostí mechanických vln ve vlhkém a suchém betonu, popsaných v kapitole 1.4.2, a podle vlhkostní mapy, měřené v kapitole 4.3.3, by měla rychlost mechanické vln dosahovat vyšších hodnot uprostřed desky. Ale dle měřených dat tomu tak není. Může to být způsobeno částečným vysycháním, kdy povrchové vrstvy v přímém kontaktu se vzduchem mají podstatně nižší vlhkost než jádro desky.



Obr. 114: Měření rychlosti povrchové vlny po výpalu desky

Naopak stav po degradaci obsahuje nápadný posun rychlostí do nižších hodnot. Prostřední část grafu vyznačená červenou barvou dosahuje hodnot v rozmezí $541\text{--}331\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a minima $321\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

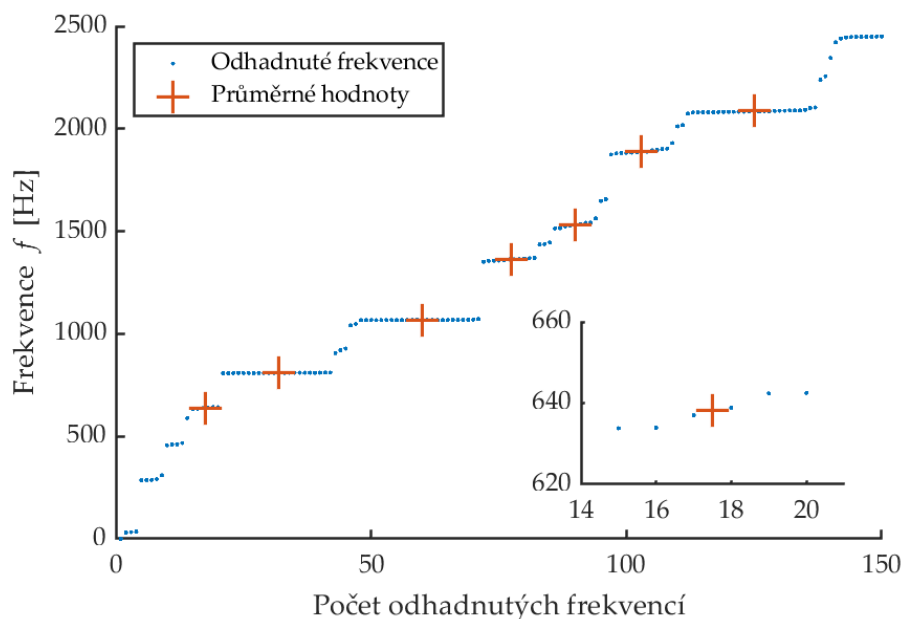
4.3.6.3 Pseudo-modální analýza

Standardní modální analýza umí stanovit vlastní frekvenční módy celého konstrukční prvku či části konstrukce [116]. Její dílčími nástroji jsou odhad vlastních frekvencí v konkrétním bodě, testování metodou špička-amplituda nebo hledání stabilních vlastních frekvencí pomocí stabilizačního diagramu. Tyto nástroje lze používat pro vyhledávání stabilních frekvencí ve spektru FRF.

Návrh na testování pomocí pseudo-modální analýzy (dále PMA) je založen na využívání těchto nástrojů pro posouzení měřených dat získaných při klasickém testování IE, znázorněných na Obr. 55 v kapitole 4.1.5 Typy testování plošného prvku.

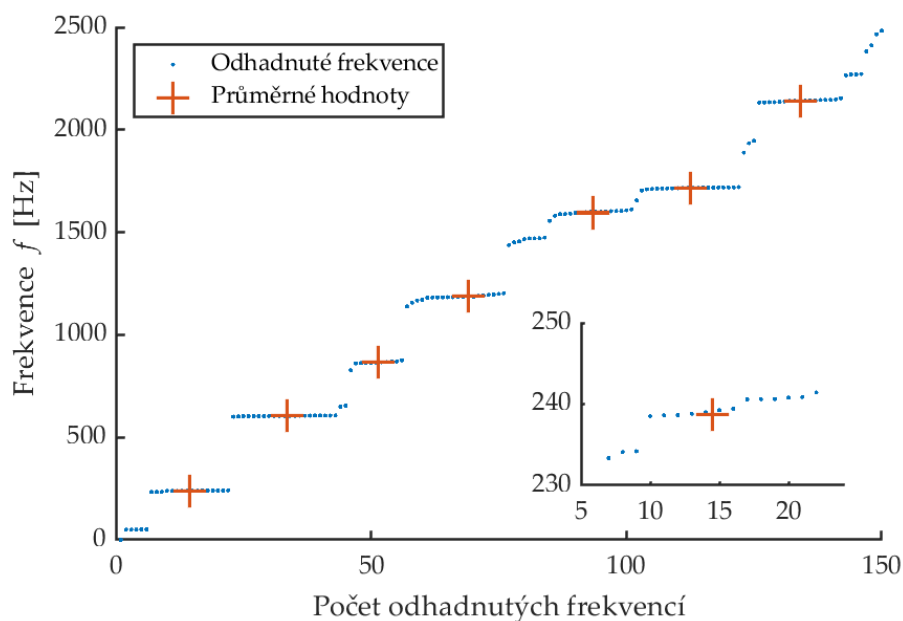
Pokud srovnáme odhadnuté frekvenční módy zkušební desky před a po tepelné degradaci znázorněné na Obr. 107, můžeme si všimnout nápadného posunu některých módů do nižší frekvenční oblasti. Toto zobrazení je však seřazenou sumou všech odhadnutých frekvencí ze všech měřících bodů. Nabízí se proto provést tuto inspekci spektra FRF v konkrétních bodech.

Zobrazení odhadnutých frekvencí je prezentováno na Obr. 115 pro nedegradovaný stav desky, a na Obr. 116 pro stav teplotně degradovaný bodu R5S5 zkušební matice. Tyto grafy znázorňují modrými tečkami jednotlivé odhadnuté frekvence FRF spektra a zvolené průměrné hodnoty. Podobný způsob zobrazení detekovaných stabilních vlastních frekvencí lze najít i v zahraničních publikacích [117].



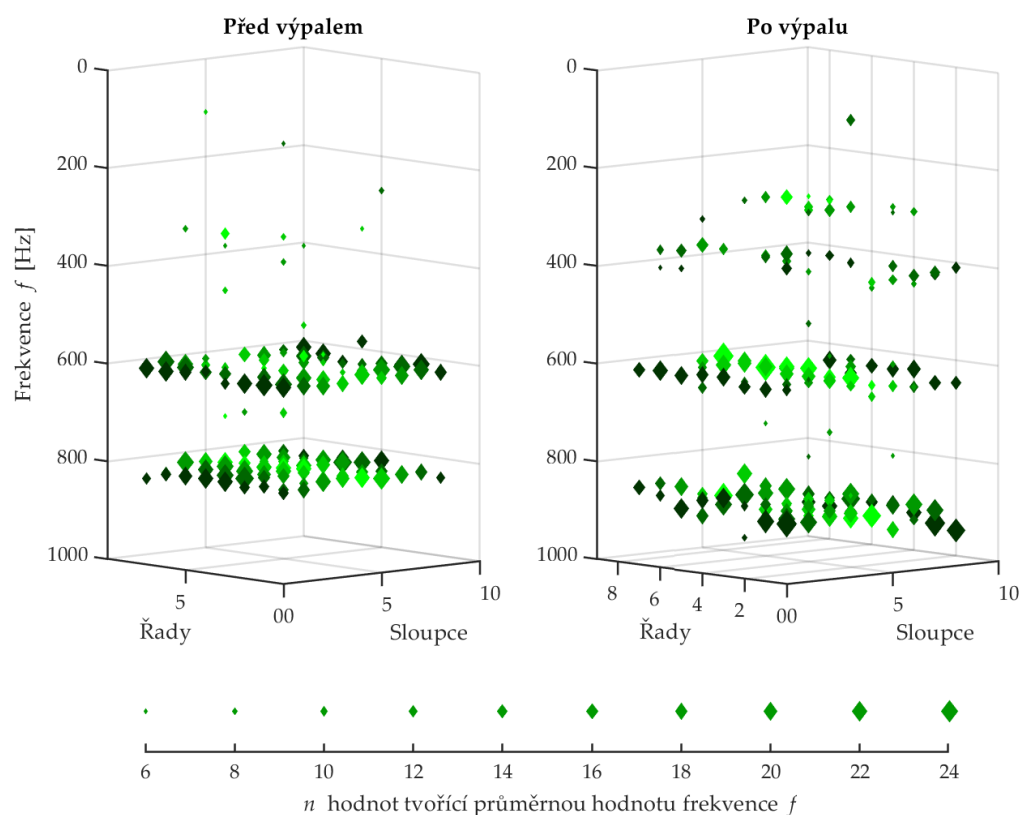
Obr. 115: Znáznornění funkce hledání průměrných frekvencí v pseudo-modální analýze ve zkušebním místě R5S5 desky v nedegradovaném stavu

Pro výběr průměrných hodnot byl navržen algoritmus SepNatFreq (Funkce pro separaci vlastních frekvencí, z ang. „Separation of natural frequency“), který vyhledává stabilní frekvence na základě dvou podmínek. Stabilní průměrná frekvence musí mít maximální rozdíl mezi dílčími hodnotami <10 Hz a zároveň musí být tvořena alespoň 4 hodnotami. Tímto způsobem lze nastavit citlivost na minimální stabilitu a zároveň získat váhu jednotlivých průměrných frekvencí (která je rovna počtu frekvencí, jež tvoří průměrnou hodnotu), což následně poslouží pro aproximaci kubickou funkcí.



Obr. 116: Znáznornění funkce hledání průměrných frekvencí v pseudo-modální analýze ve zkušebním místě R5S5 desky v degradovaném stavu

Tímto způsobem lze získat vlastní frekvence a jejich váhu v každém bodě zkušební matice. Tyto frekvence lze vizualizovat pomocí prostorového grafu znázorněného na Obr. 117.



Obr. 117: Srovnání filtrovaných průměrných rezonančních frekvencí každého zkušební bodu (světle zelené prostřední sloupec desky, tmavě zelené krajní levý a pravý sloupec desky)

Pro názornost jsou jednotlivé frekvence obarvené světle zelenou barvou, aby šlo rozpoznat, které sloupce jsou uprostřed desky a které jsou pro krajích desky. Levý graf zobrazuje vybrané průměrné frekvence zkušební desky před tepelnou degradací, pravý graf zobrazuje stav po teplotní degradaci.

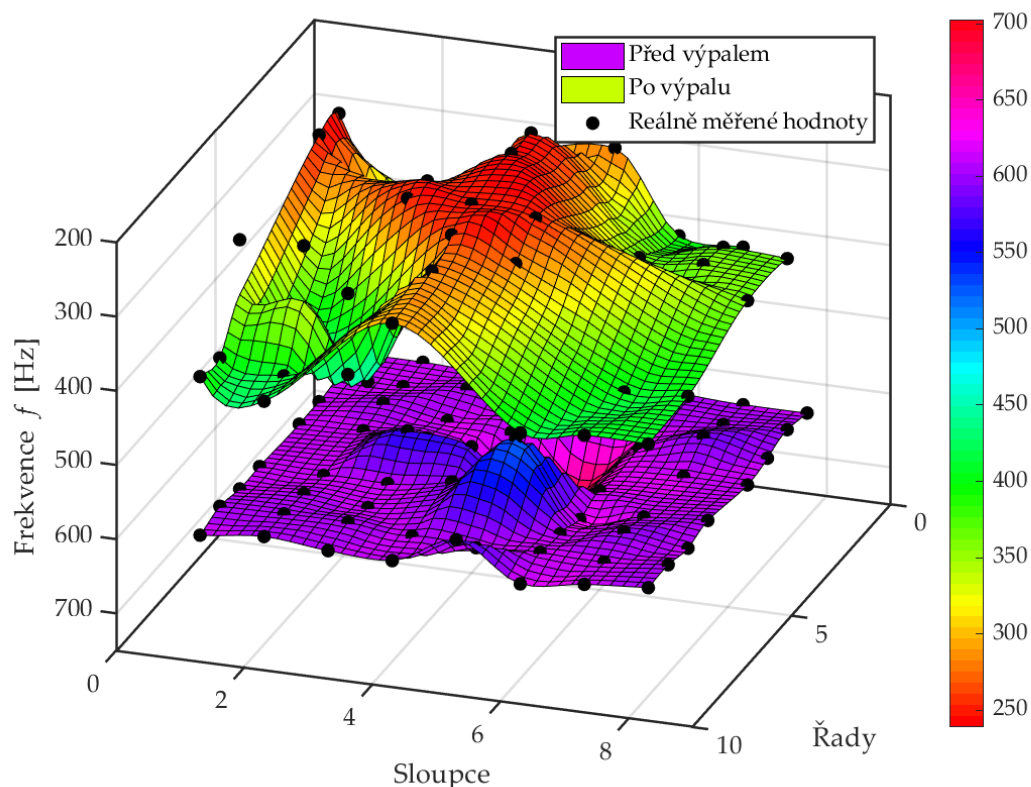
Na první pohled je patrné, že v nedegradovaném stavu jsou odhadnuté průměrné frekvence velice shodné se stanovenými stabilními frekvenčními módy získanými klasickou modální analýzou. Je zde několik přítomných frekvencí tvořených 6-10 hodnotami, ale jinak jsou hodnoty víceméně v jedné rovině.

Po tepelné degradaci, se již situace mění a průměrné frekvence, které byly v nedegradovaném stavu stabilní a v jedné frekvenční hladině, jsou mírně rozházené a frekvenční odezva teplotně degradované desky již není homogenní ve všech bodech. Zároveň se objevuje mnoho průměrných frekvencí v nižší hladině v závislosti na vzdálenosti k centru poškození desky vysokou teplotou.

Tyto dva frekvenční stavy můžeme popsat pomocí kubické aproximační funkce, kde množství hodnot tvořících průměrnou frekvenci slouží jako váha každého bodu průměrné frekvence.

Obr. 118 znázorňuje tuto interpretaci pro oba stavy desky. Pro ověření smyslnosti tohoto znázornění se vybízí srovnat tento výstup se standardním měřením pomocí IE metody znázorněném na Obr. 111. Frekvenční rovina stavu před tepelnou degradací je v případě pseudo-modální analýzy více rovnoměrná a popisuje tedy skutečný první

frekvenční mód desky. V obou případech, jak u IE tak u PMA, je přítomen lokální vrchol přibližně v 6. sloupci a ve 4. řadě, což se shoduje i s ručním vyhodnocení frekvencí v IE.



Obr. 118: Změna první rezonanční frekvence každého bodu před a po výpalu vyjádřená pomocí kubické aproximační funkce

Frekvenční rovina degradovaného stavu má již tvar kopce, který dobře koresponduje s interpretačním grafem IE znázorněným na Obr. 111. Odlišně se chovají prostřední části krajů desky, které se nachází též v nižší frekvenční hladině. Toto chování lze přisoudit k vzniklým prasklinám na krajích desky.

V průběhu tepelné degradace dochází ke změně materiálu, tak jak je popsán v kapitole 4.2 Testy na prostém betonu. Pokud dojde k nestejněmorné tepelné degradaci, je konstrukční prvek namáhán i napětím vzniklým od nesouměrné deformace způsobené teplotní roztažností. V desce tedy dochází ke vzniku konstrukčních prasklin, které mají též vliv na frekvenční odezvu. Tento fakt je jedním z hlavních důvodů, proč nelze jednoduše vytvořit přepočtení vztah mezi vlastní frekvencí v konkrétním inspekčním bodě desky a materiálovými vlastnostmi.

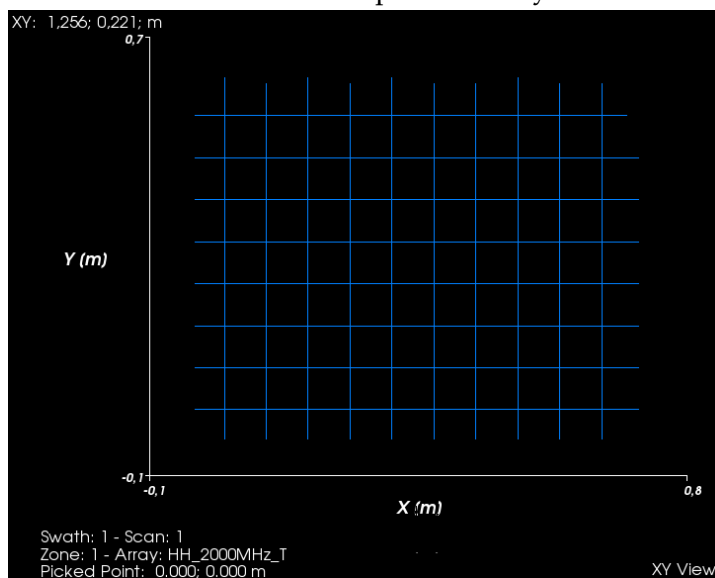
Pokud zhotovíme jádrový vývrt na konkrétním tepelně degradovaném místě, dostaneme sloupec, který je částečně tvořen vysušeným referenčním betonem a zároveň různou měrou teplotně degradovaným betonem.

Vytvořené frekvenční roviny jsou citlivé jak na změnu materiálu, tak na přítomnost prasklin. Dá se tedy říct, že metoda PMA je schopná popsat míru kumulativního poškození. Velkou výhodou oproti metodě IE je možnost nastavení citlivosti funkce SepNatFreq a rovněž možnost celkové automatizace posouzení každého inspekčního bodu. Výsledná interpretace je tak omezena až na komplexní informaci zobrazenou na Obr. 117 a Obr. 118.

4.3.7 Testování pomocí georadaru

Testování zkušebních těles či konstrukcí o rozměrnosti přesahující klasická zkušební tělesa lze poměrně dobře realizovat pomocí georadaru [73]. Pro tento účel byl použit georadar typu Ris Plus [118], který umožňuje vytváření 3D skenů testovaných konstrukcí a těles.

V rámci tohoto měření byl použit měřicí rastr o stejném rozměru, jako byla měřicí síť načrtnutá na zkušební železobetonové desce. Anténa georadaru má šířku 65 mm a vzdálenost bodů měřicí sítě je 60 mm v podélném směru a 70 mm v příčném směru. Je tedy umožněno efektivně měřit téměř celou plochu desky.



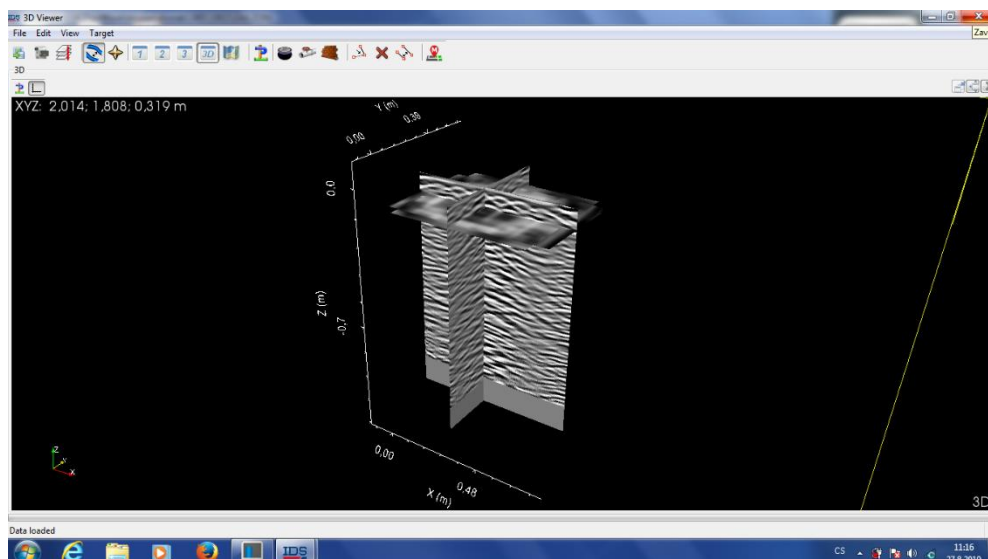
Obr. 119 Vytvořený rastr měřících B-skenů pomocí měřicí antény

Vytvořená měřicí síť je znázorněna na Obr. 119. Je patrné, že každá trasa antény přesahovala desku na začátku a na konci o 50 mm.

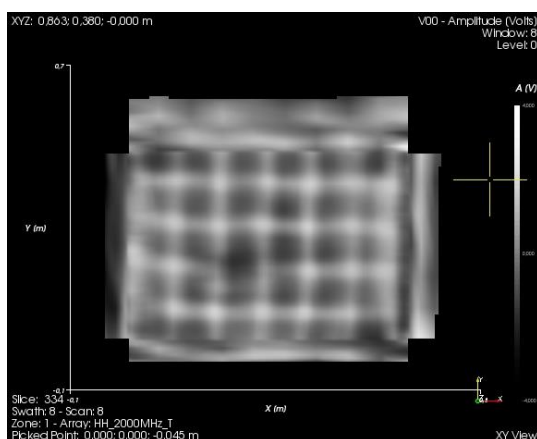
Každá modrá linka v tomto znázornění reprezentuje jeden dílčí B-sken. Pro úspěšné vytvoření 3D zobrazení bylo potřeba vytvořit pro každý podélný sken alespoň jeden příčný sken. S větší hustotou sítě by bylo možné docílit většího rozlišení, ale díky citlivosti použitého georadaru, bylo realizované měření už tak na hranici rozlišovací schopnosti. Navržená síť se však ukázala pro analýzu desky jako postačující.

Následující Obr. 120 dokumentuje programové prostředí pro práci s 3D skeny. Těleso je možné řezat třemi rovinami ve směru os x , y a z a vytvořit tak řezy v jakémkoliv směru. Pro názornost jsou na Obr. 121 až Obr. 124 uvedeny půdorysné skeny kolmé na osu z ve dvou hloubkách ve stavu před a po tepelné degradaci.

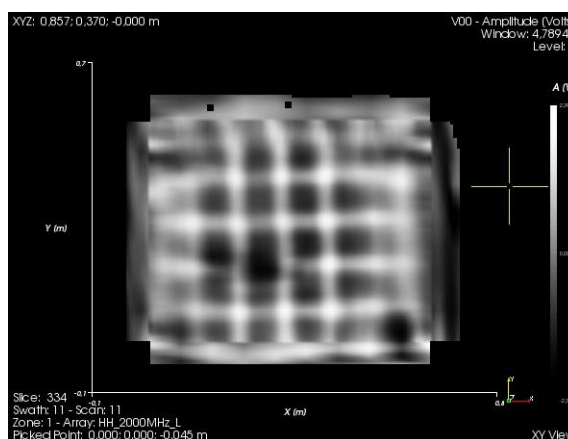
Pro zajištění stejné pozice a otočení celého skenu byla použita deska z překližky s načrtnutým zkušebním rastrem. Deska se při každém měření přiložila na betonovou desku a zavětrovala proti posunu tesařskými svorkami.



Obr. 120: Prostředí programu pro zobrazování 3D skenů



Obr. 121 Řez deskou v hloubce 45 mm před výpalem

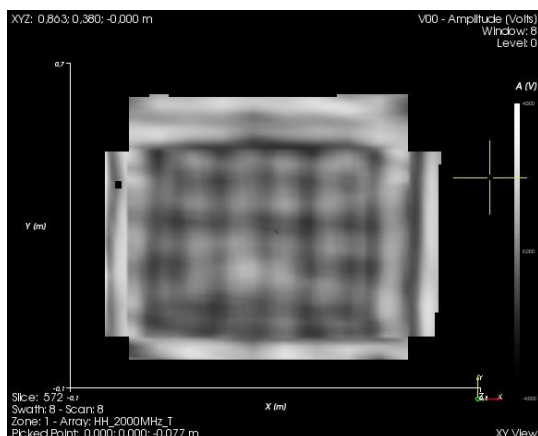


Obr. 122 Řez deskou v hloubce 45 mm po výpalu

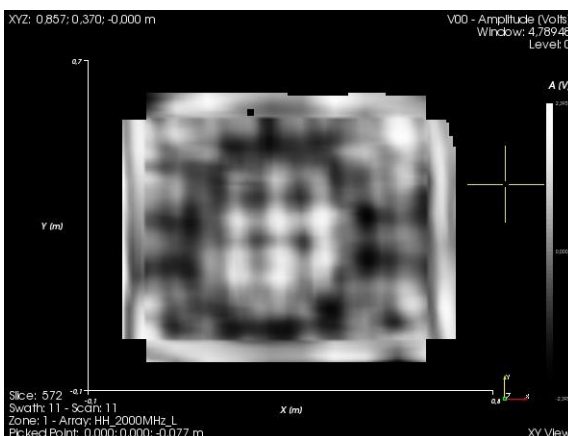
Pro hloubku řezu byla vybrána hloubka 45 mm a 77 mm od teplotně degradované strany desky. Krytí výztuže v betonové desce bylo rovno 25 mm a tloušťka překližky je právě 20 mm. První řezy na obrázku Obr. 121 a Obr. 122 tedy znázorňují řez výztužnou kari sítí.

Z provedených řezů deskou je na první pohled patrný rozdíl v redukci světlých odstínů v prostoru mezi jednotlivými pruty kari sítě. Tento jev je pravděpodobně způsoben redukcí fyzikálně vázané vody ve struktuře železobetonové desky. Tento jev je patrný v celé krycí vrstvě. Intenzita toho jevu mírně slábne v hlubších vrstvách desky čili vrstvách více vzdálených od zdroje zvýšené teploty uprostřed desky a ke krajům desky.

Pro znázornění změny ve většině zbytkové hmoty zkušební desky je tedy uveden druhý řez na Obr. 123 a Obr. 124. Jedná se o řez, který je právě v polovině nepřerušené zbývající většiny hmoty zkušební desky. Řez na Obr. 123 dobře dokumentuje hrany desky a je zde přítomná vyšší intenzita odrazu indikovaná světlou barvou.



Obr. 123 Řez deskou v hloubce 77 mm před výpalem



Obr. 124 Řez deskou v hloubce 77 mm po výpalu

Po tepelné degradaci vzniká nápadný černý kruh umístěný okolo centra desky a zároveň se centrum stává výrazně jasnější, než tomu bylo ve stavu před tepelnou degradací. Tento jev lze přisuzovat teoreticky několika faktorům.

Při výpalu desky dochází k vysušování a dehydrataci materiálu, kde kromě poškození vysokou teplotou na úrovni mikrostruktury dochází i k poškození na makroskopické úrovni, kdy vznikají trhliny, které se postupně s navyšující se teplotou shlukují do makroskopických trhlin. Provedeným testováním tak lze rozlišovat mezi oblastí zasaženou zvýšenou teplotou, ale vytvořený 3D sken více neumožňuje rozlišovat míru tohoto poškození.

Software pro zpracování 3D skenů nabízí několik algoritmů pro interpretaci měřených dat, například pro zvýraznění vodního sloupce v zemině, pro detekci kaveren, či kovových předmětů, nicméně pracuje s vlastními datovými formáty.

Pokud bychom chtěli dále zvýšit analytickou schopnost 3D skenů získaných pomocí georadaru, bylo by potřeba získat surová data a ta následně zpracovávat. Pro tento úkol by šlo použít například toolbox¹¹ pro analýzu radarových měření (ang. přek. „Radar waveform analyzer“), nicméně to svou komplexností zcela přesahuje cíle vytyčené v této práci.

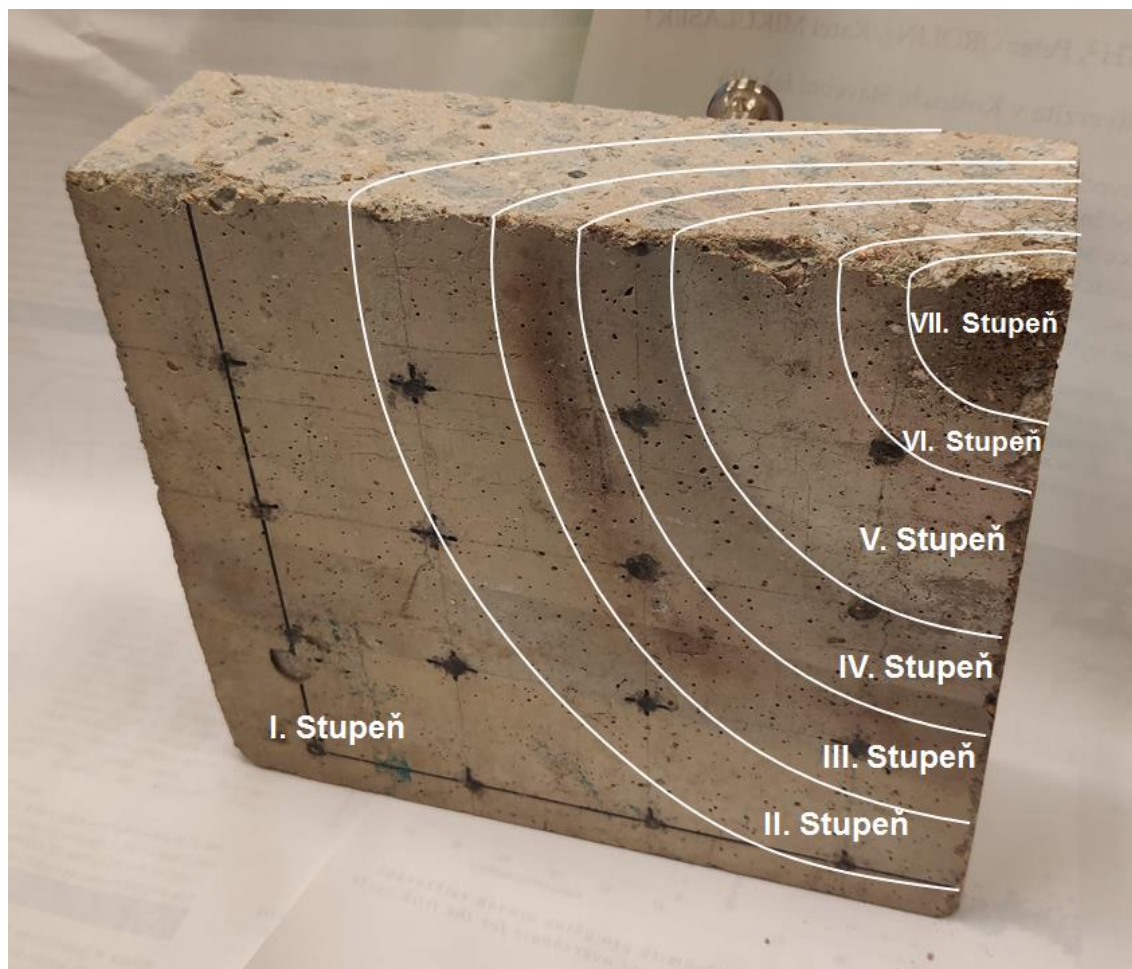
4.4 Kategorizace teplotní degradace

Pro popis stavu tepelně degradovaného betonu bylo v této práci navrženo několik experimentů založených jak na testování zkušebních těles prostého betonu různých pevnostních tříd, tak na testování železobetonového plošného prvku.

Z provedených měření na prostém betonu vyšlo najevo, že po tepelné degradaci různých pevnostních tříd betonu dochází k normalizaci fyzikálně-mechanických vlastností. Z relativního hlediska se po překročení teploty 400-600 °C jednotlivé druhy testovaných receptur chovají velmi podobně až po teplotu 1000 °C. Po překročení teploty 1200 °C dochází k částečnému slinování a mírnému zlepšení fyzikálně mechanických vlastností oproti stavu degradovaném při 1000 °C. Pokud se podíváme na obdobné testy prováděné na maltách [119], může nastat dosažení lokálního minima už při 750 °C a zpevňování už při teplotě 1000 °C. Je tedy pravděpodobné, že lokální minimum

¹¹ Obecný název programových balíčků programu Matlab

fyzikálně-mechanických vlastností může v rámci různých typů betonů též nastat při jiných teplotách než 1000 °C.



Obr. 125: Ilustrativní znázornění navržených stupňů teplotního poškození

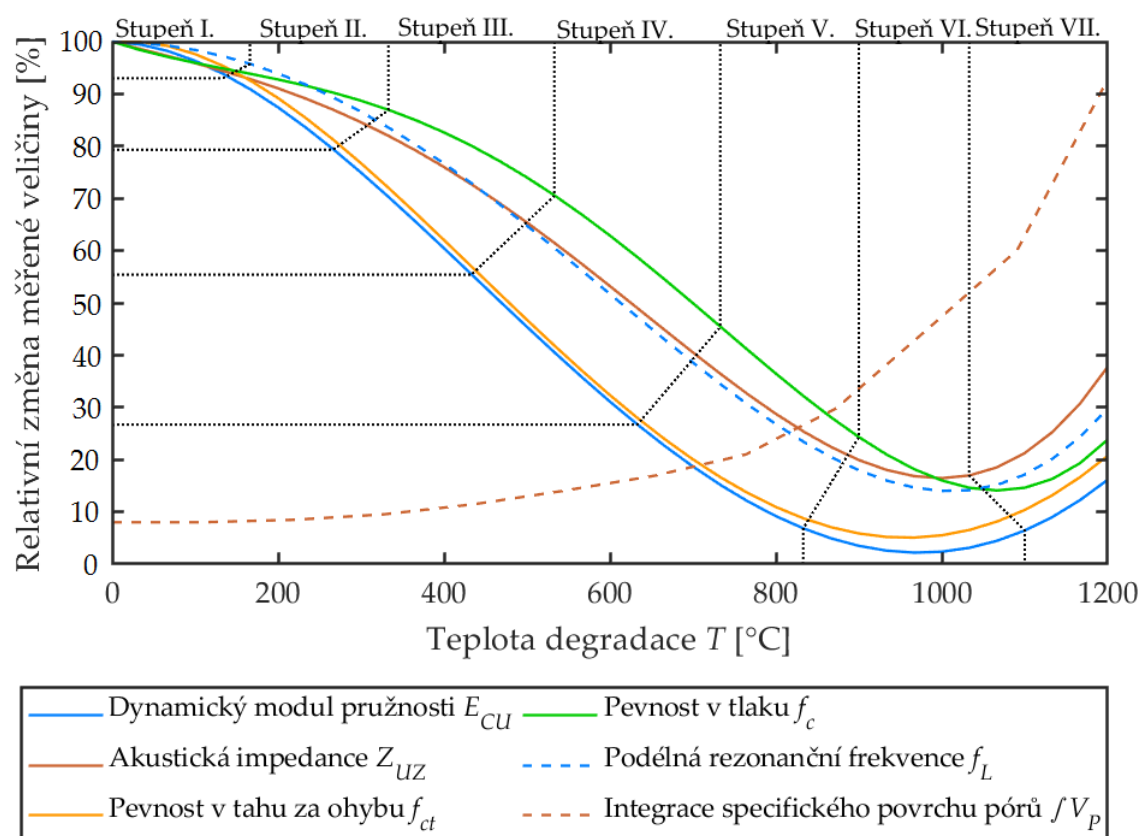
Na základě všech těchto poznatků, které jsou shrnuty v kapitolách 4.2 Testy na prostém betonu a 4.3 Testy na plošně vyztuženém železobetonovém prvku lze navrhnout stupně teplotního poškození obecně, které je znázorněno na Obr. 125.

Pokud podobné zobrazení stupňů poškození betonu vysokou teplotou zobrazíme pomocí relativní změny vybraných měření s nejvyšší korelací, dostaneme graf znázorněný na Obr. 126.

Jednotlivé fáze teplotně degradovaného betonu jsou rozděleny do 7 oblastí, a to jednu oblast nedegradovanou, s hodnotami nad 0,93 % referenční hodnoty, a do dalších 6 oblastí, které dohromady deklarují 7 stupňů poškození betonu vysokou teplotou. Zde je vhodné zmínit původní Tab. 1, která popisuje 8 fází teplotní degradace z pohledu mikrostruktury změn plniva a pojiva betonu v kapitole 1.1 Degradace betonu vysokým teplotami.

Níže navržené stupně teplotního poškození berou v potaz reálné testování materiálů pěti receptur různých pevnostních tříd. Stupně zohledňují rozptyl měřených veličin v jednotlivých teplotních oblastech od 400 do 800 °C, kde byl rozptyl měřených hodnot nejvyšší. Horizontální rozhraní stupňů leží právě na těchto hranicích tak, aby možnost chybného zařazení při opakovaném měření byla co nejmenší.

Z tohoto pohledu je mírně problematický stupeň V, VI a VII vzhledem ke kryjícím se oblastem měřených veličin z pohledu osy y . Zde je potřeba zapojit další veličinu, která se lineárně mění s rostoucí teplotou degradace. Pro tento účel lze navrhnout měřené veličiny jako jsou změna objemové hmotnosti ΔD , integrovaná hodnota specifického objemu pórů či změna barevnosti vyjádřená v převrácené sumě bitů RGB složek fotky degradované oblasti.



Obr. 126: Rozdělení vybraných měření s nejvyšší korelací do stupňů poškození vysokou teplotou

Tato metoda [120] se jeví jako poměrně jednoduchý způsob, jak rychle ale orientačně zařadit míru tepelné degradace betonu pomocí vizuálního posouzení. V případě, že je daný povrch znečištěn například sazemi z kouře, je metoda méně účinná či přímo nepoužitelná. Pro laboratorní testování s ní však není problém.

Další možností je kontrola rozdílu mezi pevností v tlaku f_c , podélnou rezonanční frekvencí f_L a akustické impedance Z_{uz} . U betonů teplotně degradovaných při 1000 a 1200 °C dochází k prohození rozdílu relativní hodnoty měřené veličiny. Relativní ztráta pevnosti v tlaku je menší, než relativní ztráta rezonanční frekvence a akustické impedance do teploty 1000 °C. Po překročení této hraniční teploty dochází k menšímu navýšení relativní pevnosti v tlaku a k vyššímu navýšení relativní rezonanční frekvence a akustické impedance. Nejvyšší rozdíl pak nastává mezi pevností v tlaku a akustickou impedancí. Právě tento rozdíl v měřených veličinách v relativním měřítku může též sloužit jako indikátor teplotního poškození, které nastalo při teplotě vyšší jak 1000 °C.

Optimálním postupem při zařazení teplotně degradovaného betonu je definování prokazatelně nedegradovaného vzorku/části konstrukce, kterou lze považovat jako referenční stav materiálu. Při testování teplotně degradovaných částí, ať už ve stavu

zkušebního tělesa či v případě testování konstrukčního prvku, je potřeba definovat referenční teplotně nezasaženou část prvku. Každá konstrukce či zkušební těleso může být degradováno mimo vysokou teplotu i jinými faktory, jako je poškození mrazem, karbonatací, statickým porušením za současné deformace či vzniku prasklin. Nedílnou součástí takového stavu může být i přítomnost dutin a kaveren, zabudovaného potrubí, výztužné sítě, inženýrských rozvodů apod. v hmotě monolitu či prefabrikátu.

5 Diskuse k výsledkům

V technické praxi jsou častěji zaznamenány požáry v průmyslových budovách než v občanské výstavbě. Je to hlavně způsobeno povahou průmyslových budov, kde jsou skladovací prostory a oběh většího množství materiálů a energií ve výrobě (např. svařování, řezání, spalování nebo prostory tunelů, mostů apod.) což dává vyšší riziko vzniku požáru, než je tomu u rodinných domů a bytových budov.

Problematika posuzování železobetonových konstrukcí po požáru je komplexní disciplínou a k její obtížnosti přispívá fakt, že v tuzemském prostředí chybí odborná technická společnost, která by se tímto typem diagnostiky dlouhodobě zabývala. Diagnostika betonových staveb se pro tyto účely přizpůsobuje a jsou při ní používány stejné postupy jako u diagnostik konstrukcí, které byly poškozeny běžným způsobem. Posuzování stavu požárem poškozených konstrukcí se tak téměř ve všech případech spoléhá na jádrové vývrty odebrané přímo z konstrukce.

Odborné publikace v současnosti a nedávné minulosti posuzují možnost nedestruktivně zkoušet a posuzovat tento typ poškození. Mnohé studie [3; 16; 85] naznačují, že vibroakustické metody, především typu IE jsou vhodné pro posuzování železobetonových konstrukcí poškozených vysokými teplotami, a to i ve srovnání s konvenčními metodami testování. Tyto metody jsou běžně používány pro zkoušení integrity pilot, homogenity betonu po odlévání monolitických konstrukcí, hledání dutin, prasklin nebo delaminace v železobetonových masivních konstrukcích. Jejich použití na požárem degradované železobetonové konstrukce však skrývá úskalí, protože je nutno zohlednit mnoho dalších faktorů. Záleží na složení zkoušeného betonu, na míře jeho degradace vlivem jiných činitelů, než bylo zvýšení teploty, a rovněž záleží na přítomnosti ocelové výztuže a jiných zabudovaných struktur.

Disertační práce si položila za cíl ověřit akustické nedestruktivní metody na laboratorně tepelně zatěžovaných zkušebních tělesech z prostého betonu pěti receptur různých pevnostních tříd. Tato první etapa experimentální části dizertační práce pomohla detailně porozumět aplikovatelnosti 13 zkušebních postupů (z toho 5 metod měření bylo založeno čistě na principu vibroakustického testování) při testování zkušebních těles teplotně degradovaného betonu. Vznikla tak poměrně robustní knihovna měřených dat a okrajových podmínek, které je potřebné respektovat pro efektivní, správnou a zároveň přesnou aplikaci jednotlivých metod.

V druhé etapě testování byly vyzkoušeny některé experimentální přístupy v oblasti delší tepelné zádrže zkušebních těles při konkrétních teplotách, či teplotní degradace zkušebních těles s prutovou výztuží. Dílčí závěry těchto experimentů lze shrnout do dvou hlavních poznatků.

1) V případě delší tepelné zádrže dochází k nejintenzivnější degradaci po prvních dvou hodinách a degradace po delší zádrži je již méně intenzivní. Tyto experimenty dobře nastínily potenciální další směr v oblasti testování teplotně degradovaného betonu, nicméně jedná se o dílčí experimenty, které byly provedeny pouze v malé míře a jsou tedy uvedeny v přílohách v kapitole 11.6 Testy na jednoduše vyztužených prvcích.

2) Pro ověření použitelnosti jednotlivých metod byla navrhnutá a vyrobena železobetonová deska o rozměrech 600×520×80 mm. V desce byl vytvořen gradient teplotního poškození s nejvyšší intenzitou degradace uprostřed desky. Cílem tohoto

experimentu bylo ověření schopnosti metod použitých v první a druhé etapě rozpoznat míru poškození na prvku, který je tvořený z části tepelně degradovaným betonem a z části z teplotně nezasaženého betonu. K desce bylo přistupováno pouze z jedné strany a sice té tepelně degradované. Povrch teplotně zatěžované strany desky byl rozdělen do čtvercové sítě, která celkem obsahovala 81 měřících bodů.

Pro účel testování železobetonové desky byly použity konvenční metody testování jako je lokální testování metodou IE, modální analýza a testování pomocí georadaru. Na základě těchto měření byl poté navrhnout experimentální postup pseudo-modální analýzy, kdy jsou posuzovány frekvenční módy v každém bodě navržené zkušební matice za použití navrženého výběrového algoritmu SepNatFreq.

Navržené akustické měření ŽB plošného panelu lze rozdělit dle přístupu. Prvním přístupem byla varianta klasického měření pomocí IE s následnou interpretací frekvenčního spektra FFT a CWT pomocí zkušenosti vyhodnocovatele a s poměrně výrazným vstupem lidského faktoru. Druhým přístupem byla metoda založená na modální analýze a pseudo-modální analýze, která je závislá čistě na nastavených okrajových podmínkách programu a jedná se tedy o strojové zpracování dat nezávislé na člověku.

Oba přístupy potvrdily použitelnost akustických metod pro lokalizaci rozložení poškození způsobeným teplotním gradientem v železobetonovém prvku. Metoda pseudo-modální analýzy vykazuje relativně dobrou citlivost i na strukturní typy poškození, jako jsou trhliny v desce. Zároveň lze říct, že druhý automatizovaný postup je schopný poskytnout obdobné výsledky jako první postup s výrazným urychlením práce. Vzniká tak možnost posuzovat poměrně velké množství výsledků, což v porovnání s lidskou prací je buď výrazně časově náročnější nebo přímo nemožné.

Teplotně degradovaný beton má obecně nižší vlastní rezonanční frekvenci než zdravý nedegradovaný beton. Pokud posuzujeme vlastní frekvenční módy konstrukce, dochází k výraznému vybočení těch částí, které jsou teplotně degradované. Toto vybočení probíhá směrem do nižší frekvenční oblasti, a může být způsobeno buď tepelnou degradací, nebo přítomností praskliny, což bylo experimentálně ověřeno.

Kromě vlastní frekvence, byla posuzována i změna rychlosti povrchových vln z měření IE. Tento způsob posouzení je vůbec nejjednodušší metodou, která dokáže posuzovat chování krycí vrstvy teplotně degradovaného betonu. Ze všech použitých metod sestává z nejnižšího počtu dílčích kroků a je nejméně ovlivněna lidským faktorem.

Výsledky zkoušek z plošného železobetonového prvku dokazují možnou použitelnost akustických metod v případě testování i komplexních konstrukčních prvků. Jedná se o pilotní experiment, jehož účelem bylo najít efektivní způsob měření, vyhodnocování a interpretace stavu degradovaného železobetonového prvku vysokou teplotou pomocí akustických nedestruktivních metod.

Je důležité podotknout, že v rámci této práce byla navržena pouze jedna zkušební deska, na které byly tyto postupy ověřeny. Cílem dalších experimentů by měla být verifikace těchto výsledků i za asymetrických podmínek. Tím je myšleno výstřední tepelné zatížení složitějšího železobetonového prvku s komplexněji položenou ocelovou výztuží, to vše takovým způsobem, aby šlo definovat, do jaké míry jsou postupy navržené v této práci použitelné i pro složitější železobetonové konstrukce.

Výhodou tepelné degradace je fakt, že touto cestou lze efektivně změnit fyzikálně mechanické vlastnosti betonu a při současné kontrole cílové teploty tak lze vytvořit poměrně dobře definované poškození. Do jisté míry tedy lze použít teplotní degradaci zkušebních těles a prvků jako simulované umělé poškození, ať už pro materiálovou optimalizaci, nebo jako součást výrobního procesu a kontrolu vlastností. Toto uplatnění lze zmínit v případě glazurovaných betonů [121], kdy vyvstává požadavek na kontrolu reziduálních vlastností produktu po výpalu.

Další z možných směrů měření je testování míry tepelné degradace v závislosti na hloubce betonového kompozitu. Tepelně degradovaný beton má výrazně odlišnou akustickou impedanci než teplotně nedegradovaný beton, díky čemuž může docházet na rozhraní degradovaného a nedegradovaného betonu k částečnému lámání a odrazu mechanické vlny. Pokud by se zkušební těleso skládalo z vrstvy betonu tepelně degradovaného při 1000 °C a části z nedegradovaného referenčního betonu, mělo by toto rozhraní materiálů být detekovatelné při analýze signálu mechanické vlny.

6 Závěr

Existuje celá řada diagnostických metod, které jsou schopné s různou přesností popsat stav betonových konstrukcí a stanovit jejich zbytkovou životnost v závislosti na typu konstrukce a požadovaných vlastnostech.

Ve své disertační práci jsem se zaměřil na aplikaci akustických nedestruktivních metod pro stanovení míry poškození teplotně degradovaného prostého betonu a laboratorních zkušebních těles ze železobetonu. Dle současného stavu poznání je zřejmé, že akustické nedestruktivní metody jsou obecně považovány za vhodný nástroj pro stanovení míry degradace či lokalizaci strukturního poškození způsobeného zvýšenou teplotou. Jako příklad lze uvést publikační činnost Hager I. [23], Ghorbanpoor A. [85], Bodnárové L. [122], Rozsypalové I. [123] či Válka J. [25], kde všichni autoři napříč poslední dekádou vyzdvihují použitelnost akustických metod a jejich vhodnost pro tento typ poškození betonových konstrukcí. Z normativního hlediska však neexistuje použitelný postup pro testování akustickými metodami reálných konstrukcí in-situ bez nutnosti odebrání zkušebních těles přímo z konstrukce a následného laboratorního testování.

Práci jsem rozdělil do tří etap, které se zároveň věnovaly řešení grantového projektu GAČR GA1602261S a tří juniorských projektů specifického výzkumu. V první etapě jsem se zaměřil na samotné zkušební metody a ověřil jejich použitelnost na 5 různých recepturách prostého betonu v teplotní zátěži 200 až 1200 °C. Na základě výsledků této první etapy jsem zpracoval vzájemné korelace mezi použitými metodami a popsal rozlišovací schopnost použitých metod a okrajové podmínky, které je potřeba zohlednit při posuzování teplotně degradovaného prostého betonu. Akustické metody zde dosahovaly hodnot korelace 0,90-0,98 s klasickými zkouškami jako je pevnost v tlaku či v tahu za ohybu.

Druhá navržená etapa přispěla k porozumění vlivu delší teplotní výdrže prostého betonu na vývoj měřených akustických parametrů teplotně degradovaného betonu. Součástí této etapy byly též měření na zkušebních trácích vyztužených v neutrální ose betonářskou výztuží. Tyto výsledky poukázaly na zajímavý vývoj vlastností při teplotní degradaci 600–1200 °C, kdy dochází k nižšímu poklesu rezonanční frekvence vyztužených tráců ve srovnání s trámcem z prostého betonu. Tyto výsledky poukázaly na další možný směr testování.

Ve třetí etapě jsem navrhl experiment, který spočíval ve vytvoření železobetonového panelu, který byl následně lokálně teplotně degradován. Cílem této třetí etapy bylo ověřit dosavadní předpoklady na relativně jednoduchém železobetonovém prvku, který byl degradován teplotním gradientem. Při testování v této etapě jsem navrhl postup testování pomocí pseudo-modální analýzy, která posuzuje vlastní frekvenční módy v diskrétní části zkušební desky. Výhoda této metody tkví převážně ve strojovém zpracování měřených dat a možnost analyticky zpracovat měření i celých úseků stavebních konstrukcí.

Veškeré zkušební postupy jsem navrhnul s důrazem na jednoduchost a univerzálnost použitých postupů a softwarových nástrojů. Měření samotné bylo založeno na využití běžných piezoelektrických snímačů, digitálního osciloskopu a zpracování dat bylo prováděno pomocí výpočetního programu Matlab, jehož licenci VUT a většina technických univerzit disponuje. Vědecký přínos lze doložit výsledky a publikacemi, nicméně pravý přínos spočívá ve sdílení výsledků a v motivaci k hledání nových nástrojů řešení mezi kolegy napříč vědeckou a technickou obcí.

Přínos pro vědní obor a praxi

Dle cílů stanovených v kapitole 2 mohu shrnout výsledky mé práce do následujících několika odstavců:

1) Celkem jsem otestoval pět zkušebních receptur, složených ze sedmi teplotních sad, testovaných třinácti různými měřicími postupy. Na základě vyjádřené korelace se pro stanovení míry degradace betonu zvýšenou teplotou jeví jako nejvhodnější parametry vlastní rezonanční frekvence f_L (potažmo i všechny ostatní měřené vlastní frekvence $f_{t,1}$, $f_{t,2}$ a f_t), dynamický modul pružnosti E_{cu} , akustická impedance Z_{uz} , pevnost v tlaku f_c a pevnost v tahu f_{ct} . Integrovaný specifický poměr pórů JV_p dosahuje obecně nízké korelace s jednotlivými metodami, nicméně s rostoucí tepelnou degradací se tato veličina chová lineárně a může dobře posloužit jako indikátor teplotního poškození ≥ 1000 °C. Tyto vyjmenované zkušební metody jsou dobře použitelné pro teplotně degradovaná zkušební tělesa.

2) Definoval jsem koeficienty k_m zohledňující heterogenitu teplotně degradovaného betonu, které lze použít při výpočtu tloušťky zkoušeného prvku či jako přepočít mezi vlastní rezonanční frekvencí podélného vlnění f_L a rychlosti P vlny C_P .

3) Zkušební metody, které dosahovaly vysoké hodnoty korelace jsem integroval do návrhu 7 stupňů teplotního poškození, které dovolují na základě relativní změny měřené veličiny stanovit teplotní oblast a stupeň degradace.

Lze konstatovat, že jednotlivé navržené receptury se při překročení teploty 400 °C začaly chovat po mechanické stránce podobně, což se projevilo ve snížení rozptylu měřených parametrů pro všechny receptury při vyšších teplotách degradace.

4) Z časového profilu změn teplot v železobetonového panelu při jeho tepelné degradaci jsem schopen nejen stanovit rozsah povrchového poškození, ale i odhadovat rozsah teplotní degradace do hloubky konstrukce.

5) Pro účel testování železobetonových konstrukcí jsem v rámci pilotního experimentu navrhnul metodický postup měření, program a softwarové nástroje v prostředí Matlab pro interpretaci měřených dat. Jedná se o strojové zpracování měřených dat, které je možné použít i na složitější konstrukce, než jsou standardní zkušební tělesa. Po teplotní degradaci dochází ke vzniku nových frekvenčních módů v nižší frekvenční oblasti. Navržený analytický postup dovoluje vyjadřovat dominanci těchto nových módů v konstrukci, které zároveň umožňují určit stupeň poškození.

6) Původní předpoklady byly potvrzeny reálným měřením, které díky automatizaci celého vyhodnocení umožňuje posuzovat i výrazně komplexnější konstrukce, než jsou zkušební tělesa prostého betonu. Tímto krokem bylo tedy umožněno reálně kalibrovat tuto metodiku a definovat požadavky pro širší využití.

7 Bibliografie

- [1] KRZEMIEŃ, K. a I. HAGER. Assessment of Concrete Susceptibility to Fire Spalling: A Report on the State-of-the-art in Testing Procedures. *Procedia Engineering*. 2015, **108**, 285-292. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.149. ISSN 18777058. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815011030>
- [2] HAGER, Izabela. Colour Change in Heated Concrete. *Fire Technology* [online]. 2014, **50**(4), 945-958 [cit. 2017-10-24]. DOI: 10.1007/s10694-012-0320-7. ISSN 0015-2684. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10694-012-0320-7>
- [3] KRZEMIEN, K. a I. HAGER. Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method. *Construction and Building Materials*. 2015, **96**, 155-163. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.007. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815302245>
- [4] THOMAS, C., J. RICO, P. TAMAYO, J. SETIÉN, F. BALLESTER a J.A. POLANCO. Neutron shielding concrete incorporating B4C and PVA fibers exposed to high temperatures. *Journal of Building Engineering*. 2019, **26**. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100859. ISSN 23527102. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710219304516>
- [5] ROZSYPALOVÁ, I., P. FRANTÍK, H. ŠIMONOVÁ, P. DANĚK, M. KRÁLÍKOVÁ a Z. KERŠNER. Optical detection of mechanical changes in concrete exposed to high temperatures. In: *Young Scientist 2018*. Košice: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2017, s. 8. ISBN 978-80-553-2952-9.
- [6] SAVOV, K., R. LACKNER a H.A. MANG. Stability assessment of shallow tunnels subjected to fire load. *Fire Safety Journal*. 2005, **40**(8), 745-763. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.07.004. ISSN 03797112. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711205000809>
- [7] SCRIVENER, Karen a R. KIRKPATRICK. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*. 2008, **38**(2), 128-136. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.025. ISSN 00088846. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884607002347>
- [8] DAMTOFT, J.S., J. LUKASIK, D. HERFORT, D. SORRENTINO a E.M. GARTNER. Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*. 2008, **38**(2), 115-127. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008. ISSN 00088846. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884607002153>
- [9] CROW, J.M. The concrete conundrum. *Chemistry World*. Royal Society of Chemistry, 2008, , 62-66. ISSN 1473-7604.
- [10] Major countries in worldwide cement production from 2014 to 2018. *Statista* [online]. b.r. [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>

- [11] Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 11/06. Praha: Česká agentura pro standartizaci, 2006.
- [12] KREIDL, M. a R. ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [13] KWAN, A. a P. NG. Building Diagnostic Techniques and Building Diagnosis: The Way Forward. *Engineering Asset Management - Systems, Professional Practices and Certification*. Cham: Springer International Publishing, 2015, , 849-862. Lecture Notes in Mechanical Engineering. DOI: 10.1007/978-3-319-09507-3_74. ISBN 978-3-319-09506-6. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-09507-3_74
- [14] ZHOU, Q. a F.P. GLASSER. Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120°C. *Cement and Concrete Research*. 2001, **31**(9), 1333-1339. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00558-0. ISSN 00088846. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884601005580>
- [15] BODNAROVA, L., J. VÁLEK, L. SÍTEK a J. FOLDYNA. Effect of high temperatures on cement composite materials in concrete structures. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. b.r., , 173-180. DOI: 10.13168/AGG.2013.0017. ISSN 12149705.
- [16] HAGER, I. *Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties*. French, 2004. PhD thesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [17] ŠTEFKOVÁ, Daniela, Michael TUPÝ, Konstantinos SOTIRIADIS, Kristýna ŠAMÁRKOVÁ a Zdeněk CHOBOLA. High-Temperature Degradation of Mortar Containing Rubber Aggregates and EVA Binder Evaluated by Impact-Echo Method. *Applied Mechanics and Materials*. b.r., , 272-275. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.627.272.
- [18] YÜZER, Nabi, Fevziye AKÖZ a Leyla ÖZTÜRK. *Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature* [online]. b.r. [cit. 2017-04-18]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604000389>
- [19] PAN, Z., Z. TAO, T. MURPHY a R. WUHRER. High temperature performance of mortars containing fine glass powders. *Journal of Cleaner Production*. 2017, **162**, 16-26. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.003. ISSN 09596526. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617311654>
- [20] MELICHAR, T., J. BYDŽOVSKÝ a A. DUFKA. Lightweight Mortar Containing High Amounts of Alternative Raw Materials with Increased Thermal Resistance. *Materials Science Forum*. 2018, **916**, 190-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.916.190. ISSN 1662-9752. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/MSF.916.190>
- [21] ROZSYPALOVA, Iva, Pavel SCHMID a Petr DANEK. Determining the Condition of Reinforced and Prestressed Concrete Structures Damaged by Elevated Temperatures. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **195**, 120-126 [cit. 2017-10-24].

- DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.533. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817320854>
- [22] SITEK, Libor, Lenka BODNÁROVÁ, Kamil SOUČEK, Lubomír STAŠ a Lucie GURKOVÁ. Analysis of inner structure changes of concretes exposed to high temperatures using micro X-ray computed tomography. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. b.r., , 79-89. DOI: 10.13168/AGG.2015.0009. ISSN 1214-9705.
- [23] HAGER, I. Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method. *Construction and Building Materials*. 2015, **2015**, 9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.007. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815302245>
- [24] CHEN, X., J. BU, W. ZHOU a Q. WANG. Effect of pre-cyclic damage and high temperature on residual tensile behavior of concrete. *Fire Safety Journal*. 2019, **108**. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102853. ISSN 03797112. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711217302485>
- [25] VÁLEK, J. *Výzkum a vývoj kompozitních materiálů s vyšší rezistencí vůči působení vyšších teplot*. Brno, 2014. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců,. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [26] GREENWOOD, N. a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-854-2738-9.
- [27] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [28] FELDMAN, R. a P. SEREDA. A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. *Matériaux et Constructions*. 1968, **1**(6), 509-520. DOI: 10.1007/BF02473639. ISSN 0025-5432. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02473639>
- [29] PINSON, M., E. MASOERO, P. BONNAUD et al. Hysteresis from Multiscale Porosity: Modeling Water Sorption and Shrinkage in Cement Paste. *Physical Review Applied*. 2015, **3**(6), 17. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.064009. ISSN 2331-7019. Dostupné také z: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.3.064009>
- [30] SHEN, J. a Q. XU. Effect of elevated temperatures on compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **229** [cit. 2019-12-03]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116846. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819322822>
- [31] VISSER, J.H.M. *Extensile hydraulic fracturing of (saturated) porous materials: doctoral thesis*. 1. Německo: Civil Engineering and Geosciences, 1998. ISBN 90-407-1699-4.
- [32] ŠAŠEK, L. *Laboratorní metody v oboru silikátů*. Praha: SNTL, 1981.
- [33] ZHAO, Jie, Jian-jun ZHENG, Gai-fei PENG a Klaas VAN BREUGEL. A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure. *Cement and Concrete Research*. 2014, **65**, 64-75. DOI:

- 10.1016/j.cemconres.2014.07.010. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884614001501>
- [34] FAN, K., D. LI, L. LI a Jiayu WU. Effect of temperature gradient on transient thermal creep of heated and stressed concrete in transient state tests. *Construction and Building Materials*. 2019, **222**, 839-851. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.197. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819316265>
- [35] TORELLI, G., P. MANDAL, M. GILLIE a V. TRAN. Concrete strains under transient thermal conditions: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*. 2016, **127**, 172-188. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.021. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029616304229>
- [36] GERNAY, T. a J.M. FRANSSSEN. A Comparison Between Explicit and Implicit Modelling of Transient Creep Strain in Concrete Uniaxial Constitutive Relationships. *Fire and Materials 2011*. London: Interscience Communications Ltd, 2011, **31**, 405-416.
- [37] ČSN EN1992-1-2. *Navrhování betonových konstrukcí: Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [38] DRZYMAŁA, Tomasz, Wioletta JACKIEWICZ-REK, Mariusz TOMASZEWSKI, Artur KUŚ, Jerzy GAŁAJ a Ritoldas ŠUKYS. Effects of High Temperature on the Properties of High Performance Concrete (HPC). *Procedia Engineering* [online]. 2017, **172**, 256-263 [cit. 2017-04-18]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.108. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817306148>
- [39] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-.
- [40] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. 1. vyd. Praha: Grada, 2006. Stavitel. ISBN 80-247-1329-2.
- [41] HOBST, Leonard, J. ADÁMEK, P. CIKRLÉ a P. SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: průvodce předmětem*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [42] ZHANG, J.K., W. YAN a D.M. CUI. Concrete Condition Assessment Using Impact-Echo Method and Extreme Learning Machines. *Sensors*. 2016, **16**(4), 447-. DOI: 10.3390/s16040447. ISSN 1424-8220. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/4/447>
- [43] LA, H., R. LIM, B. BASILY, N. GUCUNSKI, J. YI, A. MAHER, F. ROMERO a H. PARVARDEH. Autonomous robotic system for high-efficiency non-destructive bridge deck inspection and evaluation. *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, 2013, , 1053-1058. DOI: 10.1109/CoASE.2013.6653886. ISBN 978-1-4799-1515-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6653886/>
- [44] INFORMAČNÍ PORTÁL - STAVEBNÍ VÝROBKÝ: Základní požadavek č. 2 - Požární bezpečnost. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

- [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: http://www.sgpstandard.cz/editor/unmz/?u=stav_vyr/1_15_zp_2.htm
- [45] BROŽOVSKÝ, Jiří. *Nedestruktivní zkušební metody - nástroj pro hodnocení pevnosti stavebních materiálů a výrobků: Nondestructive testing methods - testing tool of building material/product strength : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTUM, 2005. ISBN 80-214-3056-7.
- [46] HURLEBAUS, S., M.B.D. HUESTE, M.M. KARTHIK a T. TERZIOGLU. *CONDITION ASSESSMENT OF BRIDGE POST-TENSIONING AND STAY CABLE SYSTEMS USING NDE METHODS: National Cooperative Highway Research Program* [online]. Texas, USA: Transportation Research Board of The National Academies, 2016 [cit. 2019-04-05].
- [47] ČSN 73 1372. *Non-destructive testing of concrete: Testing of concrete by resonance method*. 1. Prague: Cesky normalizacni institut, 1993.
- [48] *NDE, SHM & Geophysical INSTRUMENTS* [online]. b.r. [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: <http://www.olsoninstruments.com/>
- [49] *Test System Available for Purchase From Impact-Echo Instruments* [online]. b.r. [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: <http://www.impact-echo.com/Impact-Echo/products.htm>
- [50] MAZAL, P., L. PAZDERA a J. SMUTNÝ. *Identifikace kontaktního poškození materiálů a ložisek metodou akustické emise*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3826-2.
- [51] CHOI, N.S., T.W. KIM a K.Y. RHEE. *Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading*. 2005, **38**(4), 268-274. DOI: 10.1016/j.ndteint.2004.09.005. ISSN 09638695. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869504001173>
- [52] MALHOTRA, V. a Nicholas CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004. ISBN 08-031-2099-0.
- [53] CARINO, N. THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW. *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology, 2001, **18**, 1-19.
- [54] FICKER, T., L. TOPOLÁŘ a Ivo KUSÁK. Is componential strength analysis of concrete possible?. *Magazine of Concrete Research*. b.r., , 1480-1485. DOI: 10.1680/mac.13.00195.
- [55] SCHUBERT, F. a B. KÖHLER. Ten Lectures on Impact-Echo. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2008, **27**(1-3), 5-21. DOI: 10.1007/s10921-008-0036-2. ISSN 0195-9298. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10921-008-0036-2>
- [56] ROLLET, F., M. MANSELL a S. COCHRAN. Determining moisture content in concrete under simulated precipitation using ultrasonic propagation time measurements. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2008, **23**(4), 241-255. DOI: 10.1080/10589750802049070. ISSN 1058-9759. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589750802049070>

- [57] LENCIS, U., A. UDRIS a A. KORJAKINS. Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature. *Construction Science*. 2013, **14**. DOI: 10.2478/cons-2013-0011. ISSN 2255-8551. Dostupné také z: <http://content.sciendo.com/view/journals/cons/14/1/article-p71.xml>
- [58] ASTM C1383-15. *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*. 1. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [59] SANSALONE, M., J.M. LIN a W.B. STREET. A procedure for Determining P-Wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a P-wave Speed Measurement Technique. In: *ACI Materials Journal*. 1997, s. 9.
- [60] SANSALONE, Mary. a William STREETT. *Impact-echo: non-destructive evaluation of concrete and masonry*. Ithaca, N.Y.: Bullbrier Press, 1997. ISBN 978-0961261061.
- [61] CARINO, N. The Impact-Echo Method: An Overview. In: *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2001, s. 1-18. DOI: 10.1061/40558(2001)15.
- [62] CAETANO, H., G. FERREIRA, J. RODRIGUES a P. PIMIENTA. Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes. *Construction and Building Materials*. 2019, **199**, 717-736. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.074. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818330563>
- [63] *Heat transfer and fluid flow laboratory: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering* [online]. b.r. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.heatlab.cz/>
- [64] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [65] BALLON, M. *Porovnání modulů pružnosti stavebních materiálů*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [66] MIKULA, J. *ZÁKLADNÍ PŘÍSTROJE PRO NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ*. Praha: Technický a zkušební ústav stavební Praha, 2017.
- [67] ZHANG, Qi a Guang YE. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012, **110**(1), 153-158. DOI: 10.1007/s10973-012-2303-9. ISSN 1388-6150. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-012-2303-9>
- [68] JEONG, H. a D.K. HSU. Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites. *Ultrasonics*. 1995, **33**(3), 195-203. DOI: 10.1016/0041-624X(95)00023-V. ISSN 0041624X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0041624X9500023V>

- [69] ČSN EN ISO 18757. *Určování specifické plochy povrchu pevných látek adsorpcí plynu použitím BET metody*. 3.2006. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [70] WASHBURN, E. The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review*. 1921, **17**(3), 273-283. DOI: 10.1103/PhysRev.17.273. ISSN 0031-899X. Dostupné také z: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.17.273>
- [71] ROUQUEROL, J., G. BARON a Klaus UNGER. Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 2011, **84**(1), 107-136. DOI: 10.1351/PAC-REP-10-11-19. ISSN 1365-3075. Dostupné také z: <http://www.degruyter.com/view/j/pac.2012.84.issue-1/pac-rep-10-11-19/pac-rep-10-11-19.xml>
- [72] LEIMBACH, G. a H. LÖWY. *DE 237 944: Technology to locate buried objects with radar*. b.r. Německo. Uděleno 30.4.1904.
- [73] STRYK, J., R. MATULA, K. POSPÍŠIL, X. DÉROBERT, J.M. SIMONIN a A.M. ALANI. Comparative measurements of ground penetrating radars used for road and bridge diagnostics in the Czech Republic and France. *Construction and Building Materials*. 2017, **154**. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.134. ISSN 09500618.
- [74] ARDEKANI, M., X. NEYT, D. BENEDETTO, E. SLOB, B. WESEMAEL, P. BOGAERT, C. CRAEYE a S. LAMBOT. Soil moisture variability effect on GPR data. *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*. IEEE, 2014, , 214-217. DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970416. ISBN 978-1-4799-6789-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6970416/>
- [75] LAURENS, S., J. BALAYSSAC, J. RHAZI, G. KLYSZ a G. ARLIGUIE. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling. *Materials and Structures*. 2005, **38**(9), 827-832. DOI: 10.1007/BF02481655. ISSN 1359-5997. Dostupné také z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/BF02481655>
- [76] HONG, S., H. WIGGENHAUSER, R. HELMERICH, B. DONG, P. DONG a F. XING. Long-term monitoring of reinforcement corrosion in concrete using ground penetrating radar. *Corrosion Science*. 2017, **114**, 123-132. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.11.003. ISSN 0010938X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X16311611>
- [77] SEYFI, L. a E. YALDIZ. A novel software for an energy efficient GPR. *Advances in Engineering Software*. 2010, **41**(10-11), 1195-1199. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2010.07.007. ISSN 09659978. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965997810000918>
- [78] CARBOL, Ladislav. *MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ POMOCÍ PSEUDONÁHODNÉ SEKVENCE*. Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Mgr. JAN MARTINEK, Ph.D.

- [79] LIU, P.L. a P.L. YEH. *Spectral tomography of concrete structures based on impact echo depth spectra*. 2011, **44**(8), 692-702. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.09.013. ISSN 09638695. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869511001010>
- [80] RADZIEŃSKI, Maciej, Łukasz DOLIŃSKI, Marek KRAWCZUK a Magdalena PALACZ. Damage localisation in a stiffened plate structure using a propagating wave. *Mechanical Systems and Signal Processing*. b.r., , 388-395. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.02.014.
- [81] Ceramtec: CeramTec Czech Republic s.r.o. *Advanced Ceramics in Piezo Applications* [online]. Germany,; Multifunctional Ceramics Division, 2017 [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.cz/>
- [82] Snímače akustické emise. *Středisko technické diagnostiky - DAKEL* [online]. 2019 [cit. 2019-12-22]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens>
- [83] BRACEWELL, R. *The Fourier Transform & Its Applications*. 3. USA: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1999. ISBN 0073039381.
- [84] EPASTO, G., E. PROVERBIO a V. VENTURI. Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method. *Materials and Structures* [online]. 2010, **43**(1-2), 235-245 [cit. 2016-12-19]. DOI: 10.1617/s11527-009-9484-0. ISSN 13595997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-009-9484-0>
- [85] GHORBANPOOR, A. a N. BENISH. *Non-destructive testing of wisconsin highway bridge: Wisconsin highway research program—final report*. Wisconsin Department of Transportation, 2003.
- [86] MEDINA, R. a M. GARRIDO. Improving impact-echo method by using cross-spectral density. *Journal of Sound and Vibration*. 2007, **304**(3-5), 769-778. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.03.019. ISSN 0022460X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X07001824>
- [87] TŮMA, J. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901-9361-7.
- [88] XU, Y., J. BROWNJOHN a D. HESTER. Enhanced sparse component analysis for operational modal identification of real-life bridge structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, **116**, 585-605. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.07.026. ISSN 08883270. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327018304278>
- [89] SADOWSKY, J. The Continuous Wavelet Transform: A Tool for Signal Investigation and Understanding. In: *Johns Hopkins APL Technical Digest - Volume 15, Number 4*. USA, The Johns Hopkins University, 1994, s. 306-318.
- [90] SELIM, H., F. PIÑAL MOCTEZUMA, M. DELGADO PRIETO, J. FRANCISCO TRULL, L. ROMERAL MARTÍNEZ a C. COJOCARU. Wavelet Transform Applied to Internal Defect Detection by Means of Laser Ultrasound. *Wavelet Transform and Complexity*. IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.84964. ISBN 978-1-83962-658-6. Dostupné také z: <https://www.intechopen.com/books/wavelet-transform-and-complexity/wavelet-transform-applied-to-internal-defect-detection-by-means-of-laser-ultrasound>

- [91] CHANG, C., C. YU a Y. LIN. *Distinction between crack echoes and rebar echoes based on Morlet Wavelet Transform of impact echo signals*. 2019, **108**. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102169. ISSN 09638695. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869519301768>
- [92] ANDERS, B. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. 1. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-47-097811-5.
- [93] BILOŠOVÁ, A. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2758-2.
- [94] GUPTA, A., P. SEILER a B. DANOWSKY. Ground Vibration Tests on a Flexible Flying Wing Aircraft - Invited. *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016, , -. DOI: 10.2514/6.2016-1753. ISBN 978-1-62410-390-2. Dostupné také z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2016-1753>
- [95] SZCZEPANSKI, Marcin, Wojciech MIGDA a Robert JANKOWSKI. Timber Frame Houses with Different Insulation Materials - Seismic Analysis. *2017 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*. IEEE, 2017, , 389-393. DOI: 10.1109/BGC.Geomatics.2017.84. ISBN 978-1-5090-6040-5. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8071507/>
- [96] Shaker Systems and Kits. *The modal shop* [online]. MTS Systems Corporation, 2019 [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <http://www.modalshop.com/excitation/Vibration-and-Modal-Shaker-Systems-and-Kits?ID=588>
- [97] ARDA OZDEMIR, A. a S. GUMUSSOY. Transfer Function Estimation in System Identification Toolbox via Vector Fitting. *IFAC-PapersOnLine*. 2017, **50**(1), 6232-6237. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1026. ISSN 24058963. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896317315045>
- [98] HALD, A. *Statistical Theory with Engineering Applications*. 1. John Wiley & Sons Inc., 1952. ISBN 978-0471340560.
- [99] EVANS, James. *Straightforward statistics for the behavioral sciences*. Pacific Grove: Brooks/Cole Pub. Co., 1996. ISBN 05-342-3100-4.
- [100] ČSN EN ISO 12570. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků: Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [101] Testo 616 - Moisture meter for wood and building materials. *Global-Test* [online]. b.r. [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.global-test.eu/index.php/en/product/testo-616>
- [102] CARBOL, Ladislav, Jan MARTINEK a Ivo KUSÁK. Influence of Water Content on Fundamental Frequency of Mortar Sample. *Advanced Materials Research*. b.r., , 273-279. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1124.273.
- [103] EIRAS, Jesús, Cédric PAYAN, Sandrine RAKOTONARIVO a Vincent GARNIER. Experimental modal analysis and finite element model updating for structural health monitoring of reinforced concrete radioactive waste packages. *Construction*

- and Building Materials*. 2018, **180**, 531-543. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.004. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818313953>
- [104] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu: Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [105] FYLSTRA, D., L. LASDON, J. WATSON a A. WAREN. Design and Use of the Microsoft Excel Solver. *Interfaces*. 1998, **28**(5), 29-55. DOI: 10.1287/inte.28.5.29. ISSN 0092-2102. Dostupné také z: <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.28.5.29>
- [106] TOPOLAR, Libor, Lubos PAZDERA a Petr CIKRLE. Acoustic Emission Monitoring during Static Modulus Elasticity Test of Concrete Specimen. *Applied Mechanics and Materials*. b.r., , 267-272. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.486.267.
- [107] ČSN EN 12 390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [108] ČSN 73 1316. *Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vztlakovosti betonu*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1990.
- [109] NIWA, E., Ch. UEMATSU, T. HASHIMOTO a R. KOC. Evaluation of Specific Surface Area and Pore Size Distribution of LaNi 0.6 Fe 0.4 O 3 Ceramics Prepared using Pechini Method by N 2 Adsorption Method-Optimization of Sintering Temperature as Cathode Material of Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of the American Ceramic Society*. 2012, **95**(12), 3802-3806. DOI: 10.1111/jace.12022. ISSN 00027820. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/jace.12022>
- [110] BOTTCHEER, C. a O. BELLE. *Dielectrics in static fields*. 2d ed. completely rev. New York: Elsevier Scientific Pub. Co., 1973. ISBN 04-444-1019-8.
- [111] Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals. *RRUFF* [online]. b.r. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://rruff.info/>
- [112] WU, J. *A Basic Guide to Thermocouple Measurements*. Texas: Texas Instruments, 2018.
- [113] ELEMENTS OF BUILDING CONSTRUCTION. *Fire-resistance tests: Elements of building construction*. 1. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2002.
- [114] HASSANI, F.P., P. GUEVREMONT, M. MOMAYEZ, A. SADRI a K. SALEH. Application of nondestructive evaluation techniques on concrete dams. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997, **34**(3-4), 1251-12511. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)00104-4. ISSN 13651609. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160997001044>
- [115] ALSHARQAWI, M., T. ZAYED a S. ABU DABOUS. Integrated condition rating and forecasting method for bridge decks using Visual Inspection and Ground Penetrating Radar. *Automation in Construction*. 2018, **89**, 135-145. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.01.016. ISSN 09265805. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580517300821>

- [116] BAO, X., H. SUN, G. IGLESIAS, T. WANG a C. SHI. Signal denoising method for modal analysis of an offshore platform. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020, **63**. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.104000. ISSN 09504230. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423019305819>
- [117] LI, X., J. HE, M. LI, H. JIANG a Y. HUANG. Modal analysis method for tensegrity structures via stiffness transformation from node space to task space. *Engineering Structures*. 2020, **203**. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109881. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029619336697>
- [118] RIS One & RIS Plus: Compact and lightweight ground penetrating radar. *IDS Georadar* [online]. b.r. [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://idsgeoradar.com/products/ground-penetrating-radar/ris-one-and-ris-plus>
- [119] GIOSUÈ, C., A. MOBILI, C. DI PERNA a F. TITTARELLI. Performance of lightweight cement-based and alkali-activated mortars exposed to high-temperature. *Construction and Building Materials*. 2019, **220**, 565-576. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.193. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819313923>
- [120] HAGER, I. Colour Change in Heated Concrete. *Fire Technology*. 2014, **50**(4), 945-958. DOI: 10.1007/s10694-012-0320-7. ISSN 0015-2684. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10694-012-0320-7>
- [121] MARGRETHE, B.A. Glazed concrete: Development of large scale ceramic glazed concrete sculptures in public spaces. *Ceramics Technical*. 2010, (31), 7-11. ISSN 1324-4175.
- [122] VÁLEK, J., L. BODNÁROVÁ a P. NOVOSAD. Failure of Concrete at High Temperatures - The Influence of the Type of Cement. *Materials Science Forum*. 2016, **865**, 190-195. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.865.190. ISSN 1662-9752. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/MSF.865.190>
- [123] ROZSYPALOVÁ, Iva, Pavel SCHMID a Petr DANĚK. Diagnostika stropní konstrukce poškozené požárem. *TZB-info*. Praha: Topinfo s.r.o., 2016, **2016**(9), 12. ISSN 1801-4399.
- [124] NGUYỄN, H., J. CHOI, K. SONG, J. SONG, J. HUH a B. LEE. Self-healing properties of cement-based and alkali-activated slag-based fiber-reinforced composites. *Construction and Building Materials*. 2018, **165**, 801-811. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.023. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818300230>
- [125] QIU, J., H. TAN a E. YANG. Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on autogenous healing of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2016, **73**, 203-212. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.07.013. ISSN 09589465. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516303936>
- [126] PÓLYA, G. *How to solve it: a new aspect of mathematical method*. 2d ed. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1957. ISBN 06-910-2356-5.

- [127] KUSÁK, I., R. DVOŘÁK a Z. CHOBOLA. Building Materials Thermal Degradation Measurement by means of High Frequency Electromagnetic Waves. In: *Sanace a rekonstrukce staveb*. Praha, 2018, s. 1-8. ISBN 978-80-02-02838-3.

8 Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
IE		Zkušební metoda Impact-Echo
NDT		Nedestruktivní testování (ang. přek. „Non-destructive testing“)
CM		Kondiční monitorování (ang. přek. „condition monitoring“)
c	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
CSH		Kalcium-silikát-hydrát (hlavní produkt hydratace portlandského cementu)
α	$[\text{K}^{-1}]$	Koeficient lineární tepelné roztažnosti
ES		Explozivní odprýskávání (ang. přek. „explosive spalling“)
TC		Dodatečné dotvarování, či ploužení (ang. přek. „transient creep“)
RABT		Směrnice o konfiguraci a provozu silničních tunelů (ang. přek. „Directives on the Configuration and Operation of Road Tunnels“)
θ_g	$[\text{°C}]$	Teplota plynů v požárním úseku
t	$[\text{min}]$	Čas
CI		Index kondice (ang. přek. „condition index“)
P-vlna		Podélná tlaková vlna (ang. Přek. „pressure wave“)
S-vlna		Smyková ohybová vlna (ang. přek. „shear wave“)
R-vlna		Povrchová Rayleiho vlna (ang. přek. „Raylei wave“)
Z	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	Akustická impedance
ZUZ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	Akustická impedance spočtená pomocí rychlosti ultrazvuku
ϱ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Objemová hmotnost
CP	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Rychlost podélné P vlny
Rn	$[-]$	Koeficient lomu pro kolmý dopad mechanické vlny
Wh	$[\%]$	Hmotnostní vlhkost
fL	$[\text{Hz}]$	První rezonanční frekvence podélného vlnění
ft,1	$[\text{Hz}]$	První rezonanční frekvence ohybového vlnění
Ft,2	$[\text{Hz}]$	Druhá rezonanční frekvence ohybového vlnění
ft	$[\text{Hz}]$	První rezonanční frekvence kroutivého vlnění
A	$[\text{V}]$	Amplituda frekvenčního spektra
ϕ	$[\%]$	Relativní vlhkost
b	$[\text{m}]$	Šířka tělesa
h	$[\text{m}]$	Výška tělesa
l	$[\text{m}]$	Délka tělesa
m	$[\text{kg}]$	Hmotnost tělesa
ke	$[-]$	Rozměrnost prostředí
Ecu	$[\text{GPa}]$	Dynamický modul pružnosti z rychlosti průchodu ultrazvuku

Seznam použitých zkratk a symbolů

EcrL	[GPa]	Dynamický modul pružnosti betonu z frekvence podélného vlnění
Ecrf	[GPa]	Dynamický modul pružnosti betonu z frekvence kroutivého vlnění
Gcr	[GPa]	Dynamický modul pružnosti ve smyku z rezonanční frekvence kroutivého kmitání
vcr	[-]	Poissonův koeficient betonu
kc	[-]	Koeficient zohledňující vliv materiálu
f	[Hz]	Výpočtová rezonanční frekvence
UZ		Metoda měření rychlosti průchodu ultrazvukového pulzu
AE		Akustická emise
AE _{Energie}	[V·Hz ⁻¹]	Energie signálu akustické emise
Vi	[V]	Okamžitá amplituda signálu v čase
ES		Evropské společenství
Rbe	[MPa]	Nezaručená pevnost v tlaku získaná tvrdoměrnou metodou
RTG		Rentgenová difrakční analýza
λ	[nm]	Vlnová délka
θ	[°]	Úhel odrazu rentgenového záření
d	[nm]	Vzdálenost krystalových rovin
rp	[m]	Poloměr pórů
p	[Pa]	Hydrostatický tlak rtuti
γ	[N·m ⁻¹]	Povrchové napětí
θ_r	[°]	Úhel smáčení
p	[Pa]	Hydrostatický tlak
GPR		Georadar (ang. přek. „ground penetrating radar“)
EM		Elektromagnetické vlnění
B-scan		Jasová modulace pro zobrazení odrazu EM vlnění
MLS		Signál o maximální délce řetězce (ang. přek. „maximum length signal“)
U	[V]	Elektrické napětí
FFT		Rychlá Fourierova transformace, též se používá pro označení frekvenčního spektra
w	[Hz]	Dílčí frekvence frekvenčního spektra
t0		Krátký časový úsek signálu
CWT		Časově frekvenční transformace (ang. přek. „Continuous wavelet transformation“)
$\psi(t)$		Mateřská vlna
$\Psi_{s,\tau}(t)$		Transformační funkce
r		Posun hmotného kmitajícího oscilátoru
k	[N·m ⁻¹]	Tuhost oscilátoru
H(f)		Funkce frekvenční odezvy
Y(f)		Výstupní signál systému
X(f)		Vstupní signál systému

SISO		Jeden vstup – jeden výstup (ang. přek. „single input – single output“)
MISO		Více vstupů – jeden výstup (ang. přek. „multiple inputs – single output“)
ζ	[s ⁻¹]	Poměrný útlum oscilátoru
$[\psi]$		Modální matice
Rcor	[-]	Koeficient korelace
x_i		i-tá hodnota měřené veličiny x
\bar{x}		Průměrná hodnota veličiny x
S_x		Směrodatná odchylka veličiny x
n		Počet měření veličiny x
ϕT	[%]	Nedestruktivně měřená vlhkost vzorku
CBK		Cementobetonový kryt
DAQ		Záznamová jednotka (ang. přek. „data acquisition“)
ŽB		Železobeton
MKP		Metoda konečných prvků
GAČR		Grantová agentura České republiky
km		Koeficient zohledňující heterogenitu teplotně degradovaného betonu
f_c	[MPa]	Krychelná pevnost v tlaku
f_{ct}	[MPa]	Pevnost v tahu za ohybu
A	[%]	Vodní absorpance
VP	[mm ³ ·g ⁻¹]	Specifický objem pórů
$\int VP$	[%]	Integrovaný specifický objem pórů
D	[kg·m ⁻³]	Objemová hmotnost zatvrdlého betonu
T	[°C]	Teplota tepelné degradace
ε_s	[-]	Statická relativní permitivita
ε_r	[-]	Relativní permitivita
Ck	[F]	Kapacita kondenzátoru
C0	[F]	Kapacita dielektrika
σ^{-1}	[S·m ⁻¹]	Elektrická vodivost
VL	[m·s ⁻¹]	Rychlost ultrazvukového pulsu v materiálu v podélném směru zkoušení
λ_m	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti
ČB		Čerstvý beton
ZB		Zatvrdlý beton
ε	[-]	Emisivita
PMA		Pseudo-modální analýza
MODAL		Modální analýza
SepNatFreq		Funkce pro separaci vlastních frekvencí („ang. přek. „Separation of natural frequency“)

9 Seznam tabulek

TAB. 1: PŘEHLED ZMĚN V MIKROSTRUKTUŘE, KTERÉ SE PROJEVUJÍ PŘI TEPLOTNÍ ZÁTĚŽI [16]	12
TAB. 2: SEZNAM VYBRANÝCH POJMŮ V OBLASTI TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY [12]	19
TAB. 3: PŘÍKLAD HODNOT AKUSTICKÉ IMPEDANCE RŮZNÝCH MATERIÁLŮ [52]	26
TAB. 4: NAVRHNUTÉ RECEPTURY PRVNÍ SKUPINY	63
TAB. 5: NAVRHNUTÉ RECEPTURY DRUHÉ SKUPINY	64
TAB. 6: FREKVENČNÍ POMĚRY MĚŘENÝCH FREKVENCÍ F_L , $F_{T,1}$ A F_T JEDNOTLIVÝCH RECEPTUR PŘI RŮZNÉ TEPLOTNÍ DEGRADACI	67
TAB. 7: ODVOZENÉ KOEFICIENTY K_M	72
TAB. 8: ABSOLUTNÍ NAMĚŘENÉ HODNOTY PARAMETRŮ SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE (ZÍSKANÉ ZE TŘÍ NEZÁVISLÝCH MĚŘENÍ) ..	74
TAB. 9: MĚŘENÍ SCHMIDTOVÝM TVRDOMĚREM	77
TAB. 10: VÝZNAMNÉ KORELAČNÍ KOEFICIENTY R^2 PRO ΔM , D A T	81
TAB. 11: ZMĚNY OBJEMOVÉ HMOTNOSTI PŘED A PO VÝPALU JEDNOTLIVÝCH RECEPTUR	81
TAB. 12: SROVNÁNÍ PRŮMĚRNÉ HODNOTY KOEFICIENTU SPOLEHLIVOSTI R^2 JEHO ROZPTYLU S^2 V OBLASTI 1-2 GHz MEZI ORIGINÁLNĚ MĚŘENÝMI DATY ($\sigma - 1$ A $\varepsilon - 1$) A JEJICH SPOJNICÍ TRENDU ($\sigma R - 1$ A $\varepsilon R - 1$) A PEVNOSTÍ V TLAKU F_C A F_{CT} PRO RECEPTURY A, B A C	86
TAB. 13: KORELAČNÍ KOEFICIENTY R_{COR}^2 MEZI JEDNOTLIVÝMI MĚŘENÍMI, VŽDY PRO CELOU TEPLOTNÍ SADU RECEPTURY B	89
TAB. 14: NASTAVENÉ PARAMETRY MODELU PŘESTUPU TEPLA	103
TAB. 15: VLASTNÍ FREKVENCE A ÚTLUM PRO DESKU PŘED A PO TEPELNÉ DEGRADACI	106
TAB. 16: KORELAČNÍ KOEFICIENTY METOD POUŽITÝCH PŘI MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH SAD RECEPTURY A	155
TAB. 17: KORELAČNÍ KOEFICIENTY METOD POUŽITÝCH PŘI MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH SAD RECEPTURY B	156
TAB. 18: KORELAČNÍ KOEFICIENTY METOD POUŽITÝCH PŘI MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH SAD RECEPTURY C	157
TAB. 19: KORELAČNÍ KOEFICIENTY METOD POUŽITÝCH PŘI MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH SAD RECEPTURY D	158
TAB. 20: KORELAČNÍ KOEFICIENTY METOD POUŽITÝCH PŘI MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH SAD RECEPTURY E	159

10 Seznam obrázků

OBR. 1: ZNÁZORNĚNÍ PROCESU DEHYDRATACE CSH GELŮ [29]	14
OBR. 2: DEFINICE ČÁSTEČNÉHO TEPLOTNÍHO PLOUŽENÍ PŘI RŮZNÉ KOMBINACI ZATĚŽOVÁNÍ MECHANICKY A TEPLOTNĚ [34]	16
OBR. 3: PŘÍKLAD PRŮBĚHU ZÁVISLOSTI NAPĚTÍ NA DEFORMACI RŮZNĚ TEPLOTNĚ DEGRADOVANÝCH VZORKŮ BETONU [34]	16
OBR. 4: POŽÁRNÍ SCÉNÁŘE POZVOLNÉHO DLOUHO TRVAJÍCÍHO POŽÁRU [40]	18
OBR. 5: POKROČILÝ PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ POMOCÍ METODY IE V PRŮMYSLOVÉM ŘEŠENÍ DODÁVANÉ FIRMOU OLSON INSTRUMENTS INC. [48]	23
OBR. 6: KOMPLETNÍ SESTAVA ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ POMOCÍ IE METODY OD FIRMY IMPACT-ECHO INSTRUMENTS, LLC [49]	23
OBR. 7: MĚŘENÍ AKUSTICKÉ EMISE PŘI LOMOVÉ ZKOUŠCE TŘÍBODOVÝM OHYBEM [50]	24
OBR. 8: PARAMETRY NESPOJITÉHO SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE [12]	24
OBR. 9: ODRAZ A LOM VLN NA ROZHRAŇÍ DVOU RŮZNÝCH MATERIÁLŮ [52]	25
OBR. 10: ROZLIŠENÍ MECHANICKÝCH VLN PŘI BUZENÍ SIGNÁLU [53]	25
OBR. 11: NUMERICKÁ SIMULACE VLNĚNÍ V ŽB TĚLESE A ZNÁZORNĚNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ VLN [55]	27
OBR. 12: MĚŘENÍ RYCHLOSTI PRŮCHODU ULTRAZVUKU V BETONOVÉM ZKUŠEBNÍM TĚLESE RŮZNÉHO NASYCENÍ VODOU [56]	28
OBR. 13: VLIV OBSAHU HMOTNOSTNÍ VLHKOSTI NA RYCHLOST PODÉLNÉ VLN [57]	28
OBR. 14: POLOHA SOND PŘI TESTOVÁNÍ: MĚŘENÍ REZONANČNÍ FREKVENCE PODÉLNÉHO KMITÁNÍ (NAHOŘE); MĚŘENÍ PRVNÍ A DRUHÉ REZONANČNÍ FREKVENCE OHYBOVÉHO KMITÁNÍ (UPROSTŘED); MĚŘENÍ REZONANČNÍ FREKVENCE KROUTIVÉHO KMITÁNÍ (DOLE)	30
OBR. 15: SCHÉMA TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ V RÁMCI DISERTAČNÍ PRÁCE	33
OBR. 16: SCHÉMA PROCESU PŘI NÁVRHU RECEPTUR A JEJICH ŘÍZENÁ DEGRADACE A TESTOVÁNÍ	34
OBR. 17: SCHÉMA TESTOVÁNÍ ŽB PLOŠNÉHO ELEMENTU	34
OBR. 18: SCHÉMA VŠECH POUŽITÝCH METOD	35
OBR. 19: MĚŘÍCÍ APARATURA „ULTRASONIC PULSE ANALYSER“ 58-E4900 DODANÝ FIRMOU PULSONIC	36
OBR. 20: SILVER SCHMIDT TVRDOMĚR	37
OBR. 21: SOUSTAVY KRYSTALICKÝCH ROVIN S RŮZNOU MEZIROVINNOU VZDÁLENOSTÍ	38
OBR. 22: SCHÉMA SKLÁDÁNÍ RENTGENOVÝCH PAPSŮ NA KRYSTALICKÉ MŘÍŽCE	38
OBR. 23: ZÁZNAMOVÁ KARTA DAD	40
OBR. 24: ANTÉNA S VZORKOVACÍ FREKVENCÍ 5 GHz A S POJEZDOVÝM KOLEČKEM	40
OBR. 25: TESTOVACÍ SOUSTAVA	41
OBR. 26: VYOBRAZENÍ ZAŘÍZENÍ: ZDROJ STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ (RC GENERÁTOR BM492), TESTOVANÝ VZOREK, DVOUKANÁLOVÝ OSCILOSKOP, PC	41
OBR. 27: SCHÉMA APARATURY PRO MĚŘENÍ POMOCÍ MLS [78]	41
OBR. 28: SCHÉMA PRINCIPU TESTOVÁNÍ POMOCÍ METODY IE [53]	42
OBR. 29: PŘÍKLAD SIGNÁLU A JEHO FREKVENČNÍ SPEKTRUM VYTVOŘENÉ POMOCÍ FFT	44
OBR. 30: SROVNÁNÍ RŮZNÝCH VYHLAZOVACÍCH SPEKTRÁLNÍCH OKEN (VLEVO A UPROSTŘED) A VÝŘEZ KONKRÉTNÍHO DOMINANTNÍHO FREKVENČNÍHO VRCHOLU (VPRÁVO)	45
OBR. 31: PŘÍKLAD RŮZNÝCH MATEŘSKÝCH FUNKCÍ VYUŽÍVANÝCH PRO CWT [90]	47
OBR. 32: PŘÍKLAD SKALOGRAMU ZE SIGNÁLU Z PODÉLNÉHO ZKOUŠENÍ METODOU IE RECEPTURY A REFERENČNÍHO TĚLESA ..	47
OBR. 33: ZNÁZORNĚNÍ VZTAHU MEZI HMOTNOSTÍ OSCILÁTORU, TUHOSTÍ A ÚTLUMEM V MODELU SISO [92]	48
OBR. 34: VÝSTUP DÍLČÍHO MĚŘENÍ POMOCÍ FRF	49
OBR. 35: KŘIVKA FRF PROLOŽENÁ APROXIMAČNÍ FUNKCÍ METODOU ŠPIČKA-AMPLITUDA	50
OBR. 36: POLOHA PÓLŮ V ZÁVISLOSTI NA HODNOTĚ POMĚRNÉHO ÚTLUMU [93]	51
OBR. 37: PŘÍKLADY LIMITNÍCH STAVŮ KORELACE DVOU PROMĚNNÝCH X A Y [99]	52
OBR. 38: DIGITÁLNÍ OSCILOSKOP HS3	53
OBR. 39: PIEZOELEKTRICKÝ SENZOR MIDI 446s12	53
OBR. 40: SCHÉMA ZKOUŠENÍ METODOU IE	54
OBR. 41: VLHKOSTNÍ KAPACITNÍ SONTA TESTO 616	55

Seznam obrázků

OBR. 42: ZÁVISLOST PODÉLNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE A AMPLITUDY NA RELATIVNÍ VLHKOSTI ZKUŠEBNÍCH TRÁMCŮ	56
OBR. 43: KRUHOVÝ SNÍMAČ S DETAIEM UPEVNĚNÍ V Kladívku	56
OBR. 44: Kladívko bez rukojetě s plochým hrotem	57
OBR. 45: Kladívko bez rukojetě s ostrým hrotem	57
OBR. 46: Kladívko s rukojetí s ostrým hrotem	58
OBR. 47: Kladívko s rukojetí s plochým hrotem	58
OBR. 48: Příklad úderů kladívkem s ostrým hrotem, bez rukojetě	58
OBR. 49: Příklad úderů kladívkem s ostrým hrotem, s rukojetí	59
OBR. 50: Příklad úderů s kladívkem s plochým hrotem, bez rukojetě	59
OBR. 51: Příklad úderů s kladívkem s plochým hrotem, s rukojetí	59
OBR. 52: SCHÉMA ZKOUŠENÍ PLOŠNÉHO PRVKU: A) TESTOVÁNÍ POMOCÍ METODY IE V KONKRÉTNÍCH BODECH; B) TESTOVÁNÍ POMOCÍ MODÁLNÍ ANALÝZY	60
OBR. 53: SCHÉMA POSTUPU PŘI MĚŘENÍ MODÁLNÍ ANALÝZY A PSEUDO-MODÁLNÍ ANALÝZY	61
OBR. 54: FUNKCE PROGRAMU PRO ZPRACOVÁNÍ MODÁLNÍ ANALÝZY	61
OBR. 55: ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ DAT MĚŘENÝMI POMOCÍ PSEUDO-MODÁLNÍ ANALÝZY	62
OBR. 56: NÁVRH TESTOVANÝCH RECEPTUR PROSTÉHO BETONU	63
OBR. 57: KERAMICKÁ PEC RHODE KE 130B	64
OBR. 58: LABORATORNÍ SUŠÍCÍ PEC	64
OBR. 59: ILUSTRATIVNÍ ZNÁZORNĚNÍ VŠECH FÁZÍ VÝPALU V PECI	65
OBR. 60: SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRŮMĚRNÝCH DOMINANTNÍCH FREKVENCÍ TEPLOTNÍCH SAD RECEPTURY B	66
OBR. 61: PRŮMĚRNÁ REZONANČNÍ FREKVENCE PODÉLNÉHO KMITÁNÍ JEDNOTLIVÝCH RECEPTUR A TEPLOTNÍCH SAD	67
OBR. 62: RYCHLOST UZ VLN MĚŘENA IMPULZNÍ METODOU (PŘÍSTROJ PUNDIT) A NAVRŽENOU MĚŘICÍ APARATUROU U RECEPTURY B [78]	68
OBR. 63: SROVNÁNÍ MĚŘENÍ PODÉLNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE f_L METODOU IE A MLS	69
OBR. 64: PRŮMĚRNÁ AKUSTICKÁ IMPEDANCE TESTOVANÝCH RECEPTUR A DÍLČÍCH TEPLOTNÍCH SAD	70
OBR. 65: DYNAMICKÝ MODUL Z MĚŘENÍ RYCHLOSTI PRŮCHODU ULTRAZVUKU NA ZKUŠEBNÍCH TRÁMCÍCH VŠECH RECEPTUR PRO JEDNOTLIVÉ TEPLOTNÍ SADY	71
OBR. 66: SROVNÁNÍ ROZDÍLU FREKVENCE S ODVOZENÝM KOEFICIENTEM HETEROGENITY	72
OBR. 67: SROVNÁNÍ ROZDÍLU FREKVENCE S KLASICKÝM KOEFICIENTEM HETEROGENITY	72
OBR. 68: ROZMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ AKUSTICKÉ EMISE BĚHEM TŘÍBODOVÉHO OHYBOVÉHO TESTU	73
OBR. 69: MĚŘENÍ AKUSTICKOU EMISÍ VYHODNOCENÉ FORMOU DÉLKY SIGNÁLU (VLEVO) A ENERGIE SIGNÁLU (VPRAVO)	75
OBR. 70: PEVNOST V TLAKU JEDNOTLIVÝCH RECEPTUR	75
OBR. 71: PEVNOST V TAHU ZA OHYBU OHYBEM JEDNOTLIVÝCH RECEPTUR (ČTYŘ BODOVÝ OHYB)	76
OBR. 72: UPNUTÍ V LISU ZKUŠEBNÍHO TĚLESA DEGRADOVANÉHO PŘI 1200 °C	77
OBR. 73: SROVNÁNÍ PEVNOSTI V TLAKU SE NEZARUČENOU PŘENOSNOSTÍ Z TVRDOMĚRNÉ ZKOUŠKY A PEVNOSTI V TLAKU NA ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH Z DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY	78
OBR. 74: PRŮMĚRNÁ VODNÍ ABSORBANCE VYJÁDŘENÁ K SUCHÉMU VZORKU	78
OBR. 75: RTUŤOVÁ POROZIMETRIE VYBRANÝCH DVOU RECEPTUR	79
OBR. 76: SROVNÁNÍ AKUSTICKÉ IMPEDANCE (ČERVENĚ) A INTEGRACE SPECIFICKÉHO OBJEMU (MODŘE) PRO RECEPTURU B A D	80
OBR. 77: VYJÁDŘENÍ ZTRÁTY HMOTNOSTI PO VÝPALU	80
OBR. 78: SROVNÁNÍ VZORKŮ PŘIPRAVENÝCH Z DEGRADOVANÝCH TRÁMCŮ PRO PROVEDENÍ ZKOUŠKY	82
OBR. 79: VÝSLEDKY Z MĚŘENÍ MĚRNÉ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	83
OBR. 80: MĚŘENÁ PERMITIVITA (TEČKOVANĚ) PROLOŽENA POLYNOMICKOU SPOJNICÍ TRENDU 6. STUPNĚ PRO VŠECHNY TEPLOTNÍ SADY RECEPTUR A, B A C	83
OBR. 81: SROVNÁNÍ KORELAČNÍHO KOEFICIENTU R^2 PRO VŠECHNY VYBRANÉ BODY MĚRNÉ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI $\Sigma^{-1}V$ PŮVODNÍ VARIANTĚ (HORNÍ GRAFY), VARIANTĚ POLYNOMICKÉ REGRESNÍ FUNKCE (DOLNÍ GRAFY) S PEVNOSTÍ V TLAKU F_c (VLEVO) A PEVNOSTÍ V TAHU ZA OHYBU F_{ct} (VPRAVO)	84

OBR. 82: SROVNÁNÍ KORELAČNÍHO KOEFICIENTU R^2 PRO VŠECHNY VYBRANÉ BODY MĚRNÉ ELEKTRICKÉ PERMITIVITY Σ^{-1} V (HORNÍ GRAFY), S POLYNOMICKOU REGRESNÍ FUNKCÍ (DOLNÍ GRAFY) S PEVNOSTÍ V TLAKU F_c (VLEVO) A PEVNOSTÍ V TAHU ZA OHYBU F_{ct} (VPRAVO)	85
OBR. 83: VÝSTUP RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY RECEPTURY B. JEDNOTLIVÉ DIFRAKTOGRAMY JSOU PRO PŘEHLEDNOST OD SEBE ODSAZENÉ O 2000 JEDNOTEK	87
OBR. 84: VÝSTUP RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY RECEPTURY D. JEDNOTLIVÉ DIFRAKTOGRAMY JSOU PRO PŘEHLEDNOST OD SEBE ODSAZENÉ O 2000 JEDNOTEK	87
OBR. 85: KORELACE MEZI AKUSTICKOU IMPEDANCÍ A PEVNOSTÍ V TAHU ZA OHYBU	90
OBR. 86: KORELACE MEZI DYNAMICKÝM MODULEM PRUŽNOSTI A PEVNOSTÍ V TAHU ZA OHYBU	90
OBR. 87: KORELACE MEZI PODÉLNOU REZONANČNÍ FREKVENCÍ A PEVNOSTÍ V TAHU ZA OHYBU	91
OBR. 88: KORELACE MEZI DYNAMICKÝM MODULEM PRUŽNOSTI A PEVNOSTÍ V TLAKU	92
OBR. 89: PRŮNIK RELATIVNÍ ZMĚNOU MĚŘENÝCH VELIČIN VŠECH TESTOVANÝCH RECEPTUR	92
OBR. 90: SCHÉMA NAVRŽENÉHO ŽB PRVKU	95
OBR. 91: ZKUŠEBNÍ LAVICE LABORATOŘE PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ [63].	96
OBR. 92: PŘÍPRAVA KARI SÍTĚ S TERMOČLÁNKY A DISTANČNÍMI PODLOŽKAMI VE FORMĚ	97
OBR. 93: PLNĚNÍ FORMY ČB	97
OBR. 94: VÝSLEDNÁ ŽB DESKA	97
OBR. 95: VÝSLEDNÁ ŽB DESKA, STRANA OD BEDNĚNÍ	97
OBR. 96: USPOŘÁDÁNÍ ZKUŠEBNÍCH BODŮ DESKY PRO TESTOVÁNÍ DLE METODIKY ZNÁZORNĚNÉ NA SCHÉMATU OBR. 55	98
OBR. 97: MĚŘENÍ VLHKOSTI DESKY POMOCÍ SONDY TESTO PŘED A PO SUŠENÍ	99
OBR. 98: UPNUTÍ ŽB DESKY VE ZKUŠEBNÍ LAVICI LABORATOŘE PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ A USPOŘÁDÁNÍ MĚŘÍCÍ TECHNIKY U ZKUŠEBNÍ LAVICE	99
OBR. 99: DETAIL UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ V PRŮBĚHU VÝPALU	100
OBR. 100: USPOŘÁDÁNÍ IZOLACE, PECE A ZKUŠEBNÍHO TĚLESA	100
OBR. 101: PRŮBĚH TEPLIT V JEDNOTLIVÝCH TERMOČLÁNCÍCH	101
OBR. 102: KONDENZACE VODY NA TEPELNĚ ZATĚŽOVANÉ ČÁSTI DESKY	101
OBR. 103: SFÉRIKÉ ROZLOŽENÍ TEPLoty UVNITŘ TEPLTNĚ ZATĚŽOVANÉ DESKY	102
OBR. 104: POVRCH DESKY PO VYSTAVENÍ VYSOKÉ TEPLOTĚ	102
OBR. 105: MODEL ROZLOŽENÍ TEPLIT V ČASE 2:10 EXPERIMENTU	103
OBR. 106: ZOBRAZENÍ MĚŘENÝCH VELIČIN A JEJICH INTERPRETACE POMOCÍ ANALÝZY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A SKALOGRAMU SIGNÁLU PŘED A PO DEGRADACI NA MĚŘÍCÍ POZICI DESKY R5S5 (5 ŘÁDEK A 5 SLOUPEC VE ZKUŠEBNÍ MATICI)	104
OBR. 107: SROVNÁNÍ VŠECH DETEKOVANÝCH VLASTNÍCH FREKVENCÍ CELÉ ZKUŠEBNÍ DESKY A JEJICH MODELOVÁ APROXIMAČNÍ FUNKCE PŘED A PO VÝPALU	105
OBR. 108: DEFORMAČNÍ MÓD PRVNÍ STABILNÍ REZONANČNÍ FREKVENCE DESKY	106
OBR. 109: SROVNÁNÍ SLEDOVANÉ FREKVENCE F_4 PŘED VÝPALEM DESKY	108
OBR. 110: SROVNÁNÍ SLEDOVANÉ FREKVENCE F_4 PO VÝPALU DESKY	108
OBR. 111: ROZDÍL VE FREKVENCÍ F_4 PŘED A PO VÝPALU V RELATIVNÍM MĚŘÍTKU	110
OBR. 112: ŘEZ APROXIMAČNÍ KUBICKOU FUNKCÍ RELATIVNÍ ZMĚNY FREKVENCE V 6. ŘADĚ DESKY	110
OBR. 113: MĚŘENÍ RYCHLOSTI POVRCHOVÉ VLNY PŘED VÝPALEM DESKY	111
OBR. 114: MĚŘENÍ RYCHLOSTI POVRCHOVÉ VLNY PO VÝPALU DESKY	112
OBR. 115: ZNÁZORNĚNÍ FUNKCE HLEDÁNÍ PRŮMĚRNÝCH FREKVENCÍ V PSEUDO-MODÁLNÍ ANALÝZE VE ZKUŠEBNÍM MÍSTĚ R5S5 DESKY V NEDEGRADOVANÉM STAVU	113
OBR. 116: ZNÁZORNĚNÍ FUNKCE HLEDÁNÍ PRŮMĚRNÝCH FREKVENCÍ V PSEUDO-MODÁLNÍ ANALÝZE VE ZKUŠEBNÍM MÍSTĚ R5S5 DESKY V DEGRADOVANÉM STAVU	113
OBR. 117: SROVNÁNÍ FILTROVANÝCH PRŮMĚRNÝCH REZONANČNÍCH FREKVENCÍ KAŽDÉHO ZKUŠEBNÍHO BODU (SVĚTLE ZELENÉ PROSTŘEDNÍ SLOUPEC DESKY, TMAVĚ ZELENÉ KRAJNÍ LEVÝ A PRAVÝ SLOUPEC DESKY)	114
OBR. 118: ZMĚNA PRVNÍ REZONANČNÍ FREKVENCE KAŽDÉHO BODU PŘED A PO VÝPALU VYJÁDŘENÁ POMOCÍ KUBICKÉ APROXIMAČNÍ FUNKCE	115
OBR. 119: VYTVOŘENÝ RASTR MĚŘÍCÍCH B-SKENŮ POMOCÍ MĚŘÍCÍ ANTÉNY	116
OBR. 120: PROSTŘEDÍ PROGRAMU PRO ZOBRAZOVÁNÍ 3D SKENŮ	117

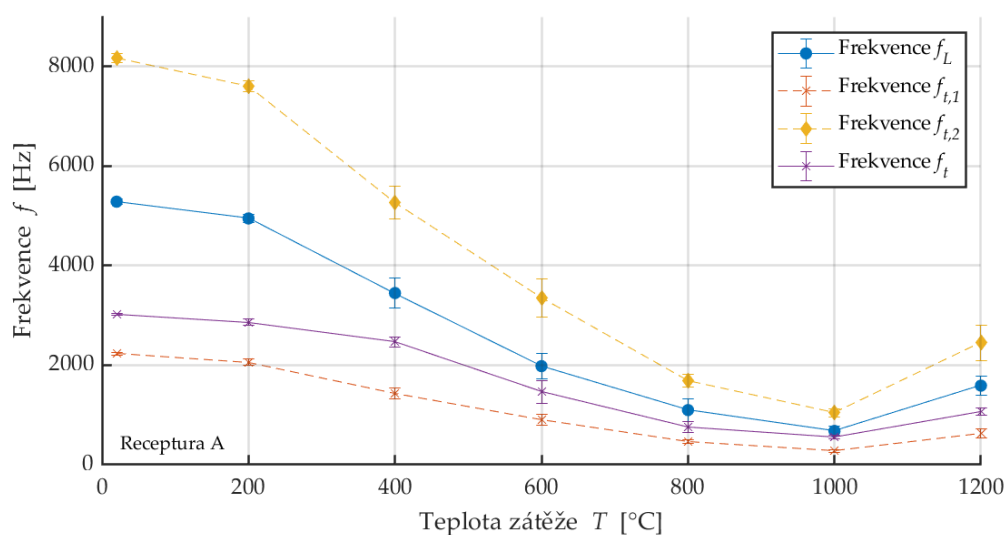
Seznam obrázků

OBR. 121 ŘEZ DESKOU V HLOUBCE 45 MM PŘED VÝPALEM.....	117
OBR. 122 ŘEZ DESKOU V HLOUBCE 45 MM PO VÝPALU	117
OBR. 123 ŘEZ DESKOU V HLOUBCE 77 MM PŘED VÝPALEM.....	118
OBR. 124 ŘEZ DESKOU V HLOUBCE 77 MM PO VÝPALU	118
OBR. 125: ILUSTRATIVNÍ ZNÁZORNĚNÍ NAVRŽENÝCH STUPŇŮ TEPLOTNÍHO POŠKOZENÍ	119
OBR. 126: ROZDĚLENÍ VYBRANÝCH MĚŘENÍ S NEJVYŠŠÍ KORELACÍ DO STUPŇŮ POŠKOZENÍ VYSOKOU TEPLOTOU	120
OBR. 127: MĚŘENÉ PRŮMĚRNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE RECEPTURY A.....	147
OBR. 128: MĚŘENÉ PRŮMĚRNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE RECEPTURY B.....	147
OBR. 129: MĚŘENÉ PRŮMĚRNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE RECEPTURY C.....	148
OBR. 130: MĚŘENÉ PRŮMĚRNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE RECEPTURY D.....	148
OBR. 131: MĚŘENÉ PRŮMĚRNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE RECEPTURY E	148
OBR. 132: SROVNÁNÍ PODOBY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A CWT DIAGRAMU RECEPTURY B REFERENČNÍ TEPLOTNÍ SADY	149
OBR. 133: SROVNÁNÍ PODOBY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A CWT DIAGRAMU RECEPTURY B SADY DEGRADOVANÉ PŘI 200 °C.....	149
OBR. 134: SROVNÁNÍ PODOBY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A CWT DIAGRAMU RECEPTURY B SADY DEGRADOVANÉ PŘI 400 °C.....	150
OBR. 135: SROVNÁNÍ PODOBY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A CWT DIAGRAMU RECEPTURY B SADY DEGRADOVANÉ PŘI 600 °C.....	150
OBR. 136: SROVNÁNÍ PODOBY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A CWT DIAGRAMU RECEPTURY B SADY DEGRADOVANÉ PŘI 800 °C.....	151
OBR. 137: SROVNÁNÍ PODOBY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A CWT DIAGRAMU RECEPTURY B SADY DEGRADOVANÉ PŘI 1000 °C.....	151
OBR. 138: SROVNÁNÍ PODOBY SIGNÁLU, FREKVENČNÍHO SPEKTRA A CWT DIAGRAMU RECEPTURY B SADY DEGRADOVANÉ PŘI 1200 °C.....	152
OBR. 139: VÝVOJ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI V ČASE	153
OBR. 140: VÝVOJ DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI V ČASE	153
OBRÁZEK 141: VÝVOJ REZONANČNÍ FREKVENCE PODÉLNÉHO KMITÁNÍ V ČASE	154
OBR. 142: SROVNÁNÍ PRVNÍ A DRUHÉ OHYBOVÉ REZONANČNÍ FREKVENCE V ČASE	154
OBR. 143: ZNÁZORNĚNÍ SLOŽENÝCH TŘÍ ÚDERŮ BUDÍCÍM Kladívkem A ODEZVA ZKUŠEBNÍHO TĚLESA ZAZNAMENANÁ SNÍMAČEM ZRYCHLENÍ.	160
OBR. 144: STABILIZAČNÍ DIAGRAM S ANALÝZOU VLASTNÍCH FREKVENČÍ A ÚTLUMU S VYZNAČENÝMI ODHADY VLASTNÍCH FREKVENČÍ.....	160
OBR. 145: ULOŽENÍ VÝZTUŽE VE FORMĚ PRO JEDNODUŠE VYZTUŽENÁ TĚLESA.....	161
OBR. 146: PODÉLNÁ REZONANČNÍ FREKVENCE JEDNODUŠE VYZTUŽENÝCH ZKUŠEBNÍCH TRÁMCŮ.....	161
OBR. 147: ZNÁZORNĚNÍ ROZDÍLU PODÉLNÉ REZONANČNÍ FREKVENCE ZKUŠEBNÍCH TĚLES PŘI RŮZNÉ DÉLCE TEPELNÉ ZÁDRŽE	162

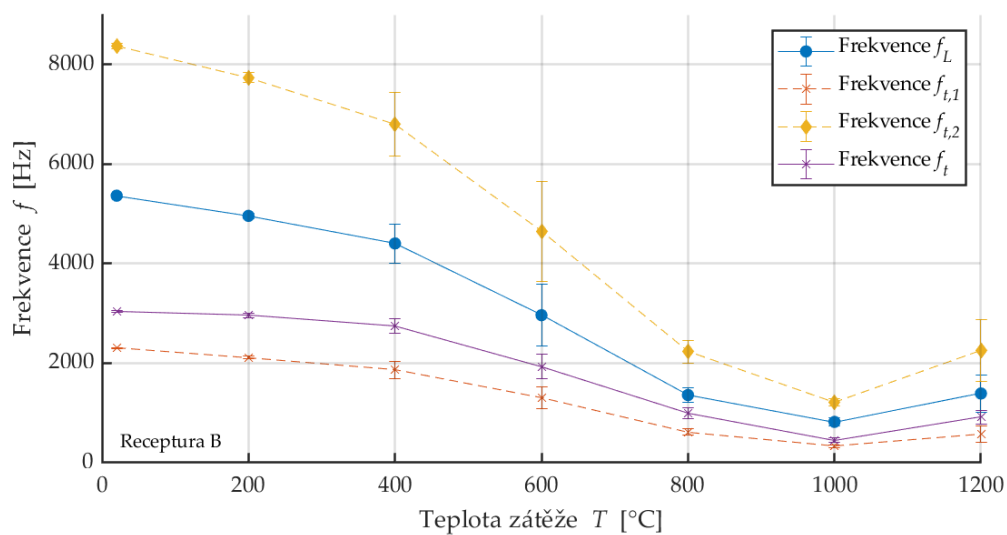
11 Přílohy

11.1 Rezonanční frekvence testovaných receptur

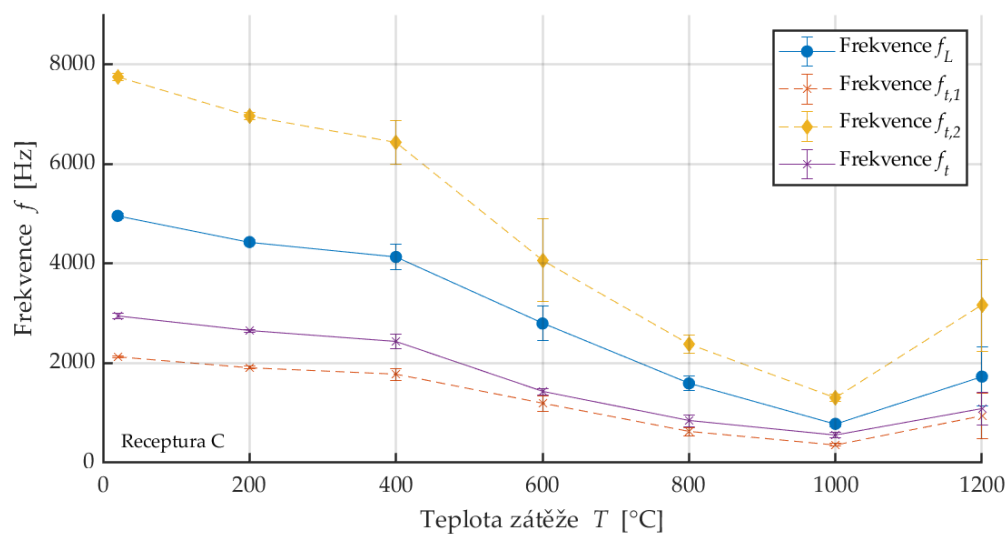
Teplotní sady vyrobených pěti receptur byly všechny testovány pomocí metody Impact-Echo v podélném, ohybovém a krutivém směru. V této kapitole jsou znázorněny grafy a závislosti všech ostatních receptur. Každý dílčí bod teplotní sady je průměrnou hodnotou, která je tvořena šesti až devíti měřeními.



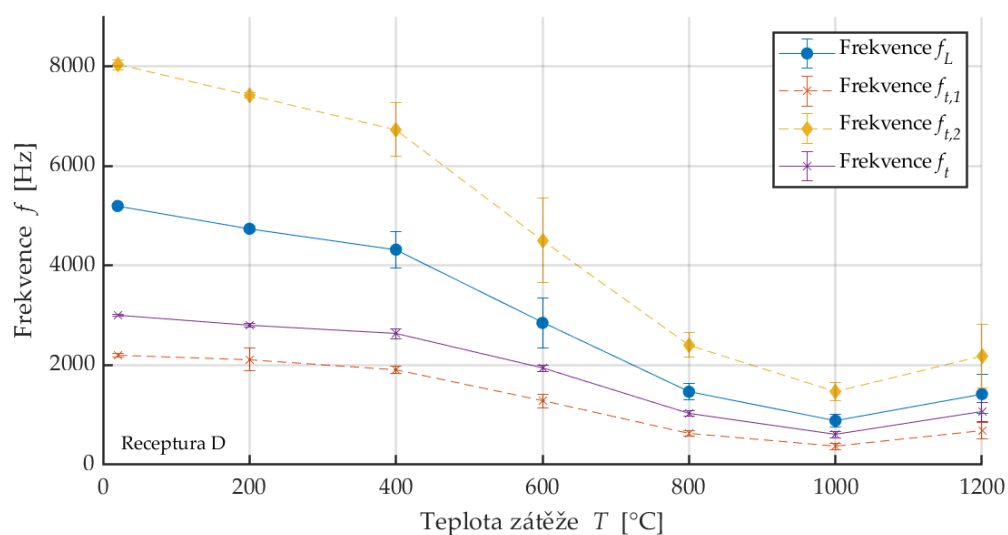
Obr. 127: Měřené průměrné rezonanční frekvence receptury A



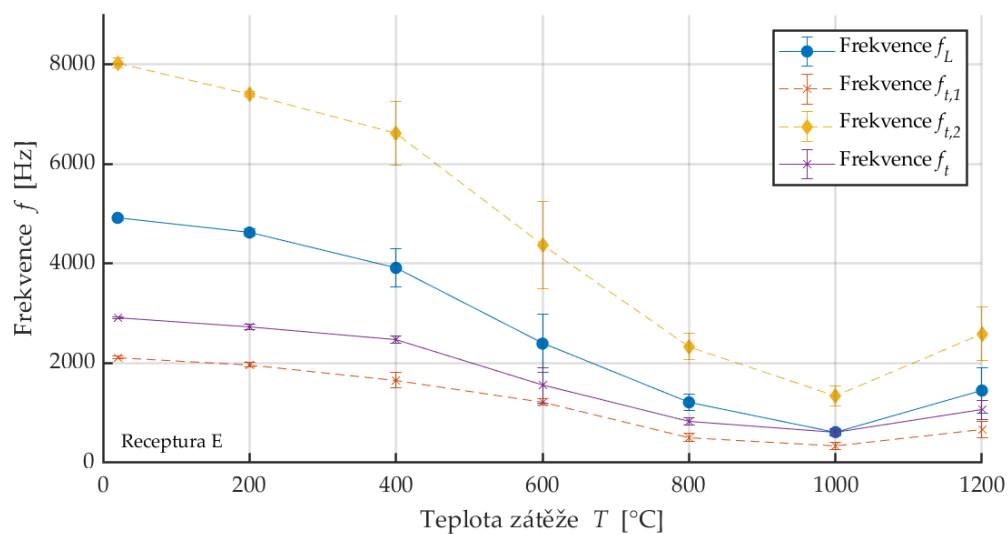
Obr. 128: Měřené průměrné rezonanční frekvence receptury B



Obr. 129: Měřené průměrné rezonanční frekvence receptury C



Obr. 130: Měřené průměrné rezonanční frekvence receptury D

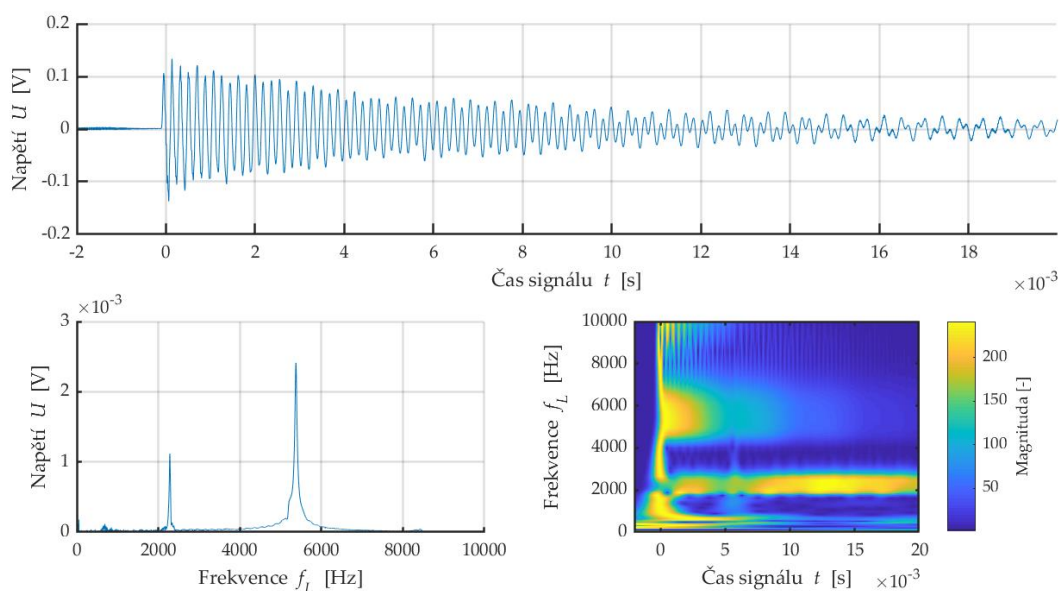


Obr. 131: Měřené průměrné rezonanční frekvence receptury E

11.2 Srovnání CWT a FFT napříč teplotami

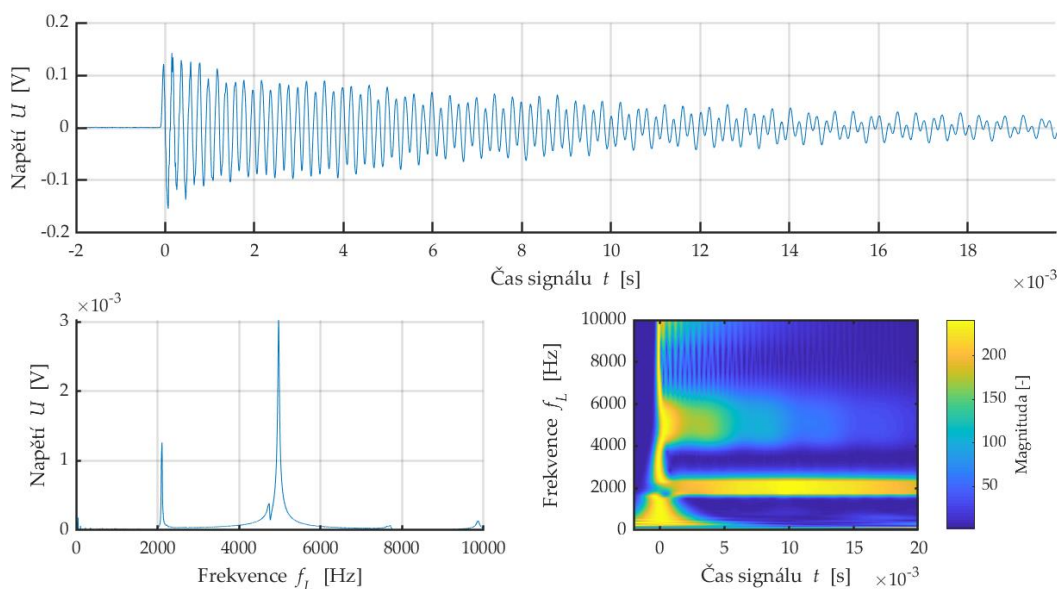
Při posuzování vlastní rezonanční frekvence byla použita transformace typu FFT a CWT. V této kapitole jsou uvedena spektra FFT a CWT pro celou teplotní sadu receptury B. Jedná se o vybraná reprezentativní měření v podélném směru vždy jednoho tělesa z celé teplotní sady.

Receptura B - 20 °C



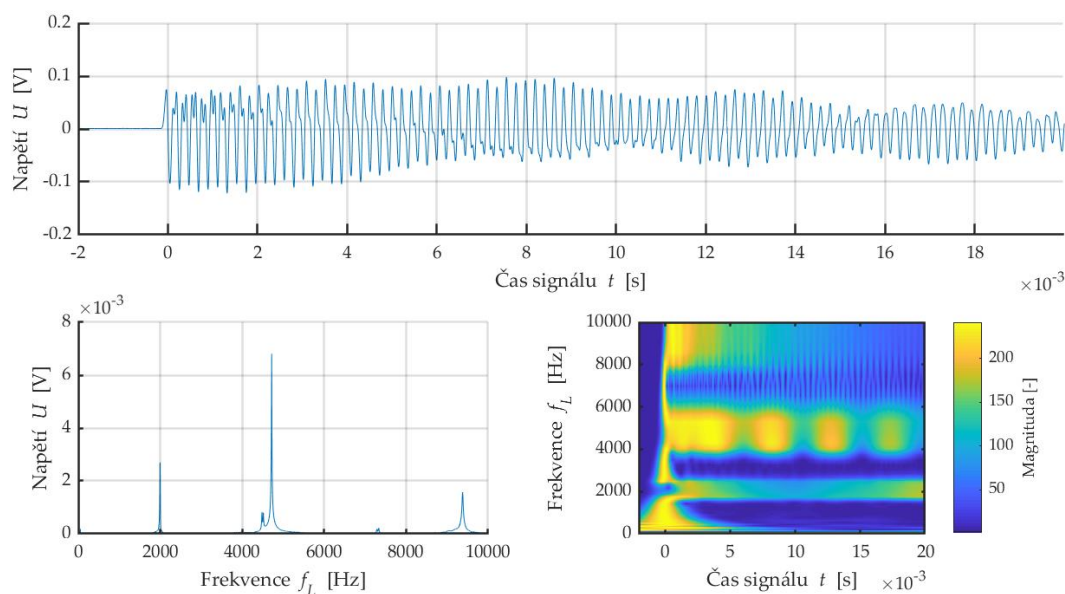
Obr. 132: Srovnání podoby signálu, frekvenčního spektra a CWT diagramu receptury B referenční teplotní sady

Receptura B - 200 °C



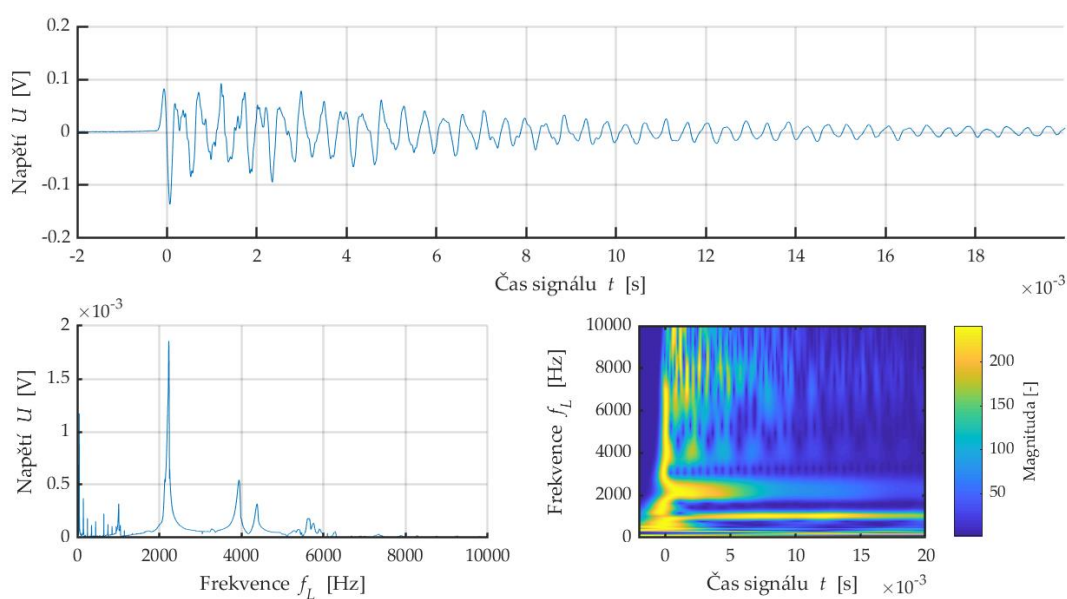
Obr. 133: Srovnání podoby signálu, frekvenčního spektra a CWT diagramu receptury B sady degradované při 200 °C

Receptura B - 400 °C



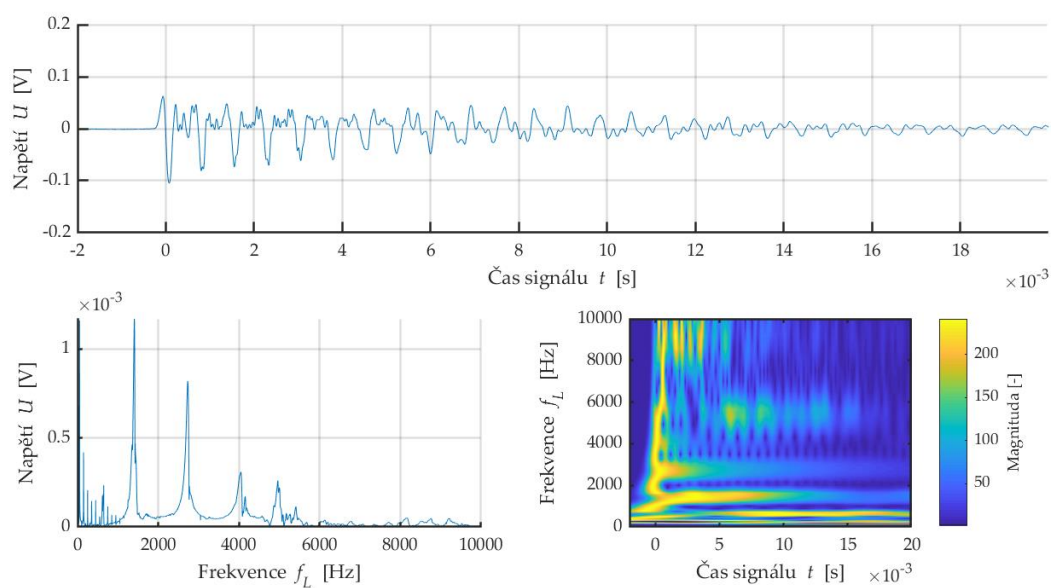
Obr. 134: Srovnání podoby signálu, frekvenčního spektra a CWT diagramu receptury B sady degradované při 400 °C

Receptura B - 600 °C



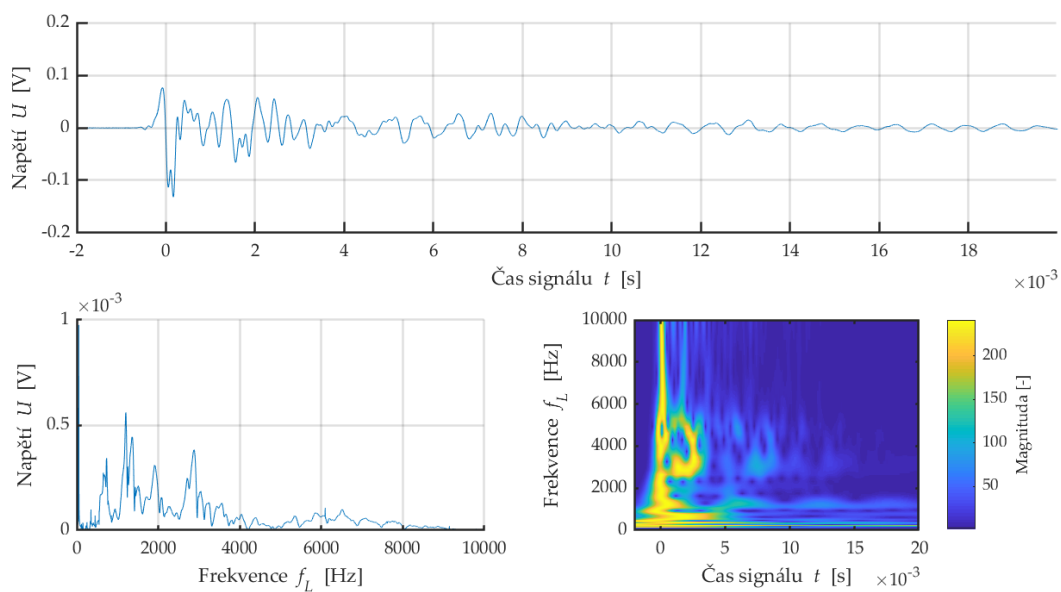
Obr. 135: Srovnání podoby signálu, frekvenčního spektra a CWT diagramu receptury B sady degradované při 600 °C

Receptura B - 800 °C

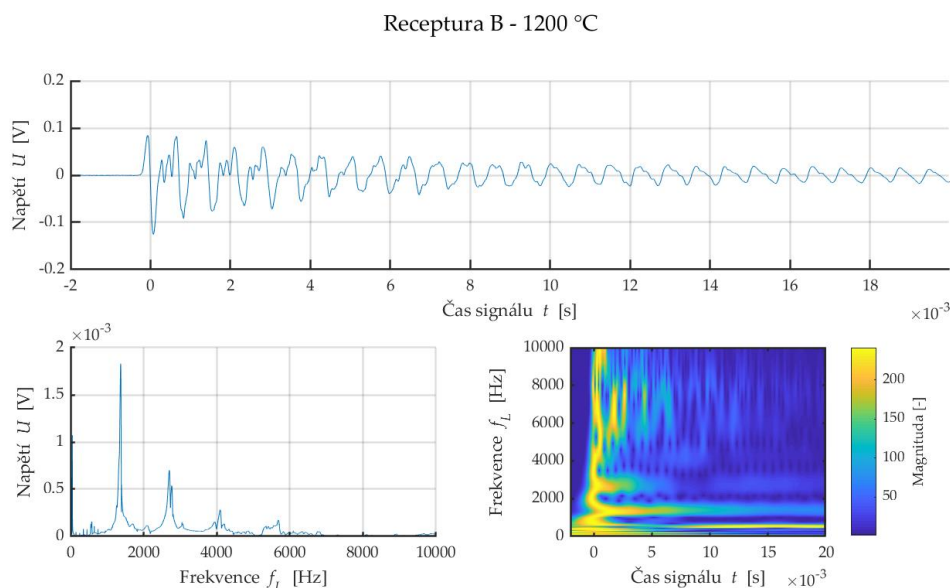


Obr. 136: Srovnání podoby signálu, frekvenčního spektra a CWT diagramu receptury B sady degradované při 800 °C

Receptura B - 1000 °C



Obr. 137: Srovnání podoby signálu, frekvenčního spektra a CWT diagramu receptury B sady degradované při 1000 °C



Obr. 138: Srovnání podoby signálu, frekvenčního spektra a CWT diagramu receptury B sady degradované při 1200 °C

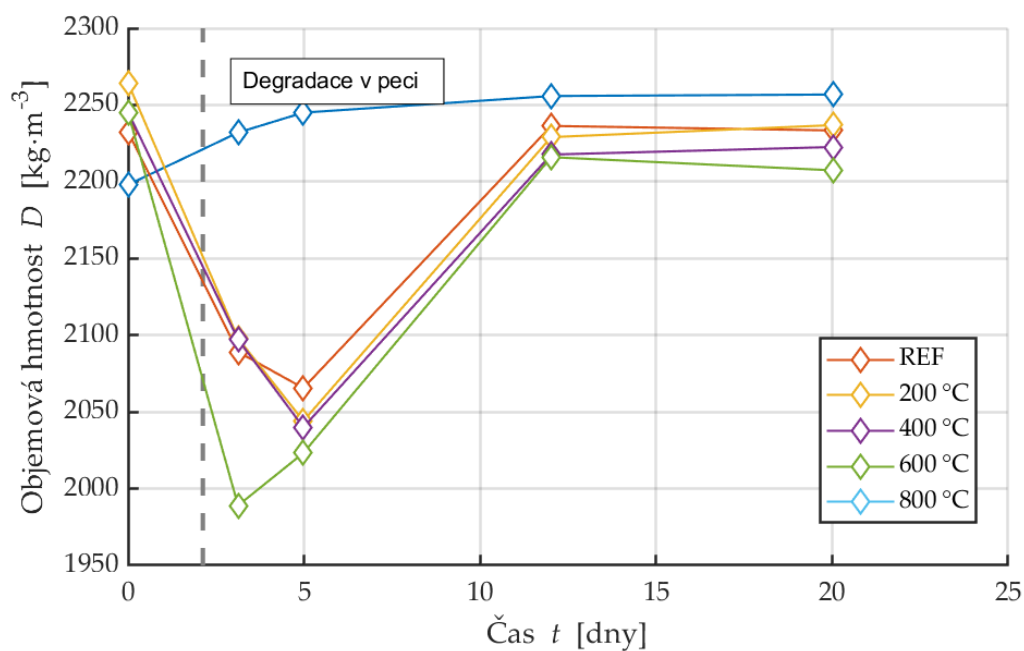
11.3 Využití IE pro sledování sebehojení

Výhodou NDT měření je možnost opakovatelnosti měření na témže vzorku. Příklad takového postupu je prezentován na měření jevu sebehojení [124]. Jedná se o schopnost materiálu, který byl degradován a došlo v jeho struktuře k vzniku trhlin. Pokud přesahují tyto trhliny tloušťku nad 50 μm a vzorek stále obsahuje potenciálně hydraulicky aktivní fáze, může docházet zpětné hydrataci. Tímto procesem tak mohou vznikat nové krystaly. Tímto procesem může docházet k „zacelování“ vzniklých trhlin. Bylo experimentálně prokázáno [125], že pokud vzniklé trhliny přesahují šířku 150 μm je šance zacelení těchto trhlin velice nízká.

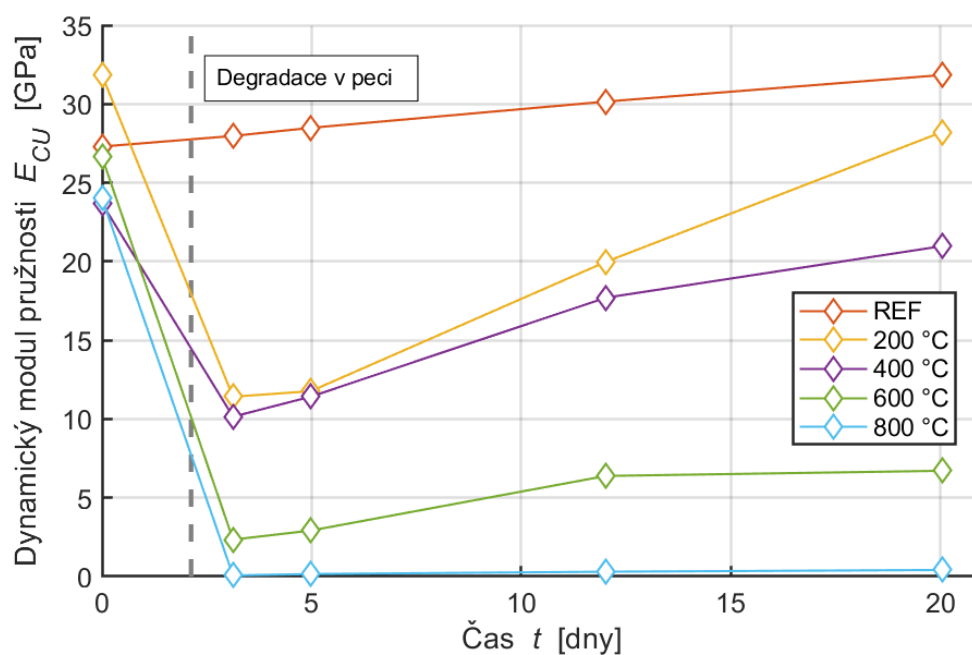
Právě tento jev bylo možné dokumentovat v čase na alkalicky aktivovaných a cementových maltách. V rámci tohoto experimentu byla zkušební tělesa o rozměru 40×40×160 mm degradována různými teplotami. Náběh teplot byl nastaven na 300 °C/hod a zadrž na této teplotě byla 1 hodina.

Zkušební tělesa byla měřena před a po této degradaci pomocí metody IE a UZ. Poté byla tělesa umístěna do vodní lázně a v pravidelných intervalech byla opět měřena pomocí IE a UZ. Výsledný vývoj rezonanční frekvence a rychlosti je znázorněn na obrázcích Obr. 139-Obr. 142.

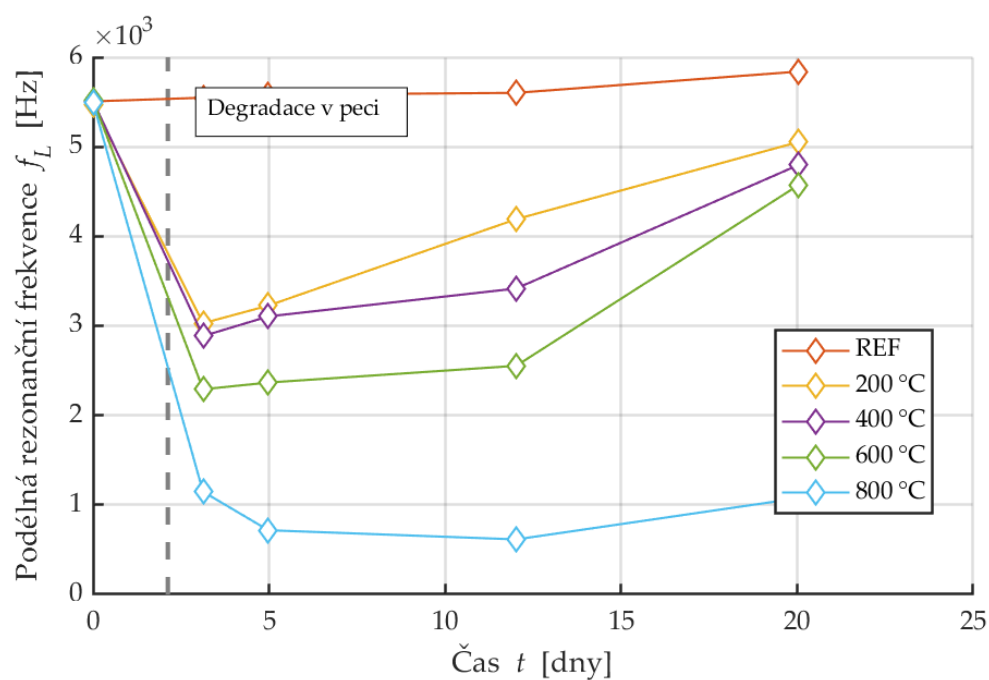
Rezonanční frekvence v podélném směru dosahuje velmi vysoké korelace s mechanickými vlastnostmi materiálu jako jsou pevnost v tlaku či pevnost v tahu. Stejně je tomu i s rychlostí ultrazvukového signálu a následně vyjádřeného dynamického modulu pružnosti. Z přiložených měření jde dobře rozpoznat vliv různé teploty na schopnost sebehojení u jednotlivých zkušebních těles vyjádřené změnou objemové hmotnosti, dynamického modulu pružnosti, rezonanční frekvence podélného a kroutivého kmitání.



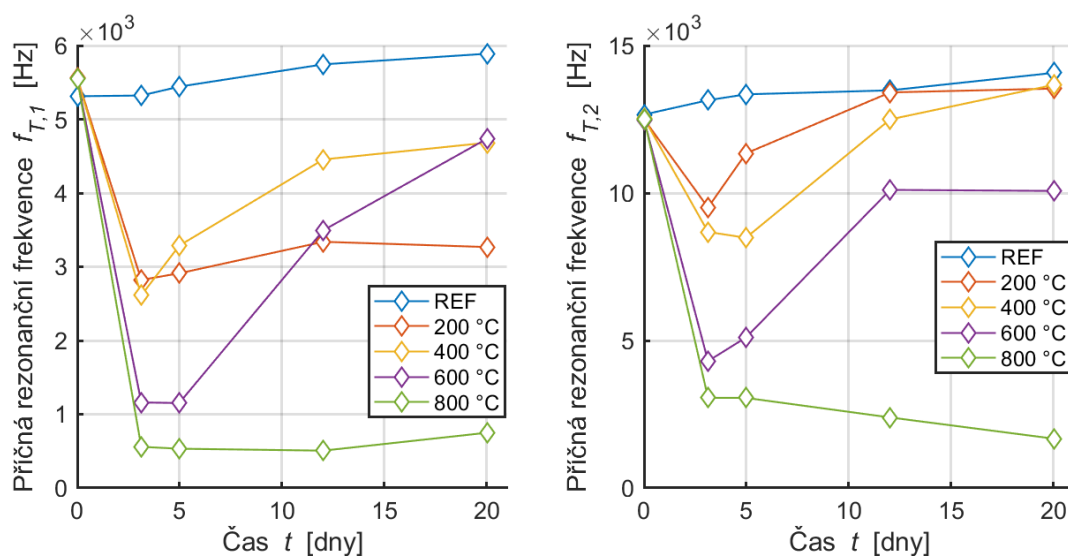
Obr. 139: Vývoj objemové hmotnosti v čase



Obr. 140: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase



Obrázek 141: Vývoj rezonanční frekvence podélného kmitání v čase



Obr. 142: Srovnání první a druhé ohybové rezonanční frekvence v čase

11.4 Korelace mezi jednotlivými měřeními

Tab. 16: Korelační koeficienty metod použitých při měření teplotních sad receptury A

-	T	ΔD	A	D	V_L	f_L	$f_{t,1}$	$f_{t,2}$	f_t	E_{Cu}	Z_{UZ}	f_{ct}	f_c	t_{AE}	$AE_{energie}$	ε^{-1}	σ^{-1}
T	1,000	0,865	0,858	0,703	0,808	0,832	0,853	0,842	0,839	0,823	0,818	0,805	0,951	0,797	0,698	0,944	0,804
ΔD	0,865	1,000	0,829	0,822	0,767	0,812	0,830	0,821	0,758	0,839	0,789	0,835	0,752	0,784	0,922	0,898	0,916
A	0,858	0,829	1,000	0,568	0,957	0,942	0,954	0,953	0,911	0,930	0,961	0,941	0,898	0,932	0,714	0,958	0,849
D	0,703	0,822	0,568	1,000	0,558	0,623	0,641	0,630	0,551	0,701	0,586	0,658	0,525	0,423	0,704	0,698	0,760
V_L	0,808	0,767	0,957	0,558	1,000	0,987	0,989	0,992	0,977	0,961	0,999	0,980	0,845	0,827	0,711	0,886	0,751
f_L	0,832	0,812	0,942	0,623	0,987	1,000	0,998	0,998	0,974	0,986	0,991	0,992	0,828	0,795	0,768	0,901	0,799
$f_{t,1}$	0,853	0,830	0,954	0,641	0,989	0,998	1,000	1,000	0,975	0,985	0,993	0,992	0,850	0,814	0,771	0,918	0,810
$f_{t,2}$	0,842	0,821	0,953	0,630	0,992	0,998	1,000	1,000	0,975	0,985	0,996	0,993	0,843	0,813	0,765	0,912	0,803
f_t	0,839	0,758	0,911	0,551	0,977	0,974	0,975	0,975	1,000	0,928	0,974	0,950	0,865	0,790	0,723	0,857	0,689
E_{Cu}	0,823	0,839	0,930	0,701	0,961	0,986	0,985	0,985	0,928	1,000	0,971	0,991	0,790	0,760	0,774	0,914	0,858
Z_{UZ}	0,818	0,789	0,961	0,586	0,999	0,991	0,993	0,996	0,974	0,971	1,000	0,987	0,845	0,829	0,731	0,898	0,775
f_{ct}	0,805	0,835	0,941	0,658	0,980	0,992	0,992	0,993	0,950	0,991	0,987	1,000	0,792	0,793	0,794	0,897	0,824
f_c	0,951	0,752	0,898	0,525	0,845	0,828	0,850	0,843	0,865	0,790	0,845	0,792	1,000	0,869	0,583	0,919	0,710
t_{AE}	0,797	0,784	0,932	0,423	0,827	0,795	0,814	0,813	0,790	0,760	0,829	0,793	0,869	1,000	0,677	0,881	0,766
$AE_{energie}$	0,698	0,922	0,714	0,704	0,711	0,768	0,771	0,765	0,723	0,774	0,731	0,794	0,583	0,677	1,000	0,734	0,780
ε^{-1}	0,944	0,898	0,958	0,698	0,886	0,901	0,918	0,912	0,857	0,914	0,898	0,897	0,919	0,881	0,734	1,000	0,921
σ^{-1}	0,804	0,916	0,849	0,760	0,751	0,799	0,810	0,803	0,689	0,858	0,775	0,824	0,710	0,766	0,780	0,921	1,000

Tab. 17: Korelační koeficienty metod použitých při měření teplotních sad receptury B

-	T	ΔD	A	D	V_L	f_L	$f_{t,1}$	$f_{t,2}$	f_t	E_{CU}	Z_{UZ}	f_{ct}	f_c	R_{be}	t_{AE}	$AE_{energie}$	ε^{-1}	σ^{-1}	$\int V_P$
T	1,000	0,871	0,013	0,883	0,861	0,902	0,912	0,901	0,883	0,884	0,886	0,883	0,965	0,689	0,797	0,698	0,831	0,647	0,555
ΔD	0,871	1,000	0,028	0,839	0,769	0,803	0,806	0,806	0,736	0,852	0,811	0,860	0,832	0,524	0,788	0,924	0,878	0,914	0,199
A	0,013	0,028	1,000	0,033	0,160	0,135	0,134	0,143	0,160	0,096	0,137	0,098	0,066	0,355	0,232	0,043	0,164	0,03	0,189
D	0,883	0,839	0,033	1,000	0,599	0,653	0,662	0,649	0,604	0,684	0,645	0,674	0,776	0,361	0,570	0,701	0,653	0,694	0,665
V_L	0,861	0,769	0,160	0,599	1,000	0,994	0,989	0,993	0,985	0,976	0,997	0,944	0,901	0,849	0,800	0,688	0,794	0,536	0,210
f_L	0,902	0,803	0,135	0,653	0,994	1,000	0,999	1,000	0,990	0,972	0,996	0,949	0,929	0,853	0,827	0,701	0,835	0,575	0,209
$f_{t,1}$	0,912	0,806	0,134	0,662	0,989	0,999	1,000	0,999	0,992	0,963	0,991	0,943	0,941	0,865	0,845	0,695	0,851	0,581	0,442
$f_{t,2}$	0,901	0,806	0,143	0,649	0,993	1,000	0,999	1,000	0,990	0,970	0,995	0,950	0,933	0,861	0,841	0,701	0,846	0,58	0,247
f_t	0,883	0,736	0,160	0,604	0,985	0,990	0,992	0,990	1,000	0,937	0,979	0,910	0,933	0,905	0,836	0,624	0,813	0,500	0,267
E_{CU}	0,884	0,852	0,096	0,684	0,976	0,972	0,963	0,970	0,937	1,000	0,987	0,975	0,889	0,732	0,765	0,783	0,789	0,626	0,242
Z_{UZ}	0,886	0,811	0,137	0,645	0,997	0,996	0,991	0,995	0,979	0,987	1,000	0,957	0,915	0,824	0,812	0,730	0,816	0,584	0,263
f_{ct}	0,883	0,860	0,098	0,674	0,944	0,949	0,943	0,950	0,910	0,975	0,957	1,000	0,868	0,723	0,770	0,736	0,816	0,636	0,134
f_c	0,965	0,832	0,066	0,776	0,901	0,929	0,941	0,933	0,933	0,889	0,915	0,868	1,000	0,799	0,893	0,690	0,864	0,613	0,251
R_{be}	0,689	0,524	0,355	0,361	0,849	0,853	0,865	0,861	0,905	0,732	0,824	0,723	0,799	1,000	0,832	0,411	0,762	0,346	0,214
t_{AE}	0,797	0,788	0,232	0,570	0,800	0,827	0,845	0,841	0,836	0,765	0,812	0,770	0,893	0,832	1,000	0,677	0,951	0,680	0,214
$AE_{energie}$	0,698	0,924	0,043	0,701	0,688	0,701	0,695	0,701	0,624	0,783	0,730	0,736	0,690	0,411	0,677	1,000	0,75	0,911	0,141
ε^{-1}	0,831	0,878	0,164	0,653	0,794	0,835	0,851	0,846	0,813	0,789	0,816	0,816	0,864	0,762	0,951	0,750	1,000	0,804	0,255
σ^{-1}	0,647	0,914	0,030	0,694	0,536	0,575	0,581	0,580	0,500	0,626	0,584	0,636	0,613	0,346	0,68	0,911	0,804	1,000	0,541
$\int V_P$	0,555	0,199	0,189	0,665	0,210	0,209	0,442	0,247	0,267	0,242	0,263	0,134	0,251	0,214	0,214	0,141	0,255	0,541	1,000

Tab. 18: Korelační koeficienty metod použitých při měření teplotních sad receptury C

-	T	ΔD	A	D	V_L	f_L	$f_{t,1}$	$f_{t,2}$	f_t	E_{Cu}	Z_{Uz}	f_{ct}	f_c	t_{AE}	$AE_{energie}$	ε^{-1}	σ^{-1}
T	1,000	0,816	0,523	0,832	0,703	0,869	0,786	0,819	0,839	0,791	0,730	0,733	0,701	0,797	0,698	0,975	0,576
ΔD	0,816	1,000	0,643	0,803	0,699	0,754	0,723	0,749	0,769	0,854	0,732	0,850	0,632	0,769	0,952	0,872	0,706
A	0,523	0,643	1,000	0,276	0,741	0,699	0,759	0,738	0,752	0,805	0,746	0,807	0,583	0,476	0,676	0,536	0,206
D	0,832	0,803	0,276	1,000	0,466	0,600	0,517	0,559	0,575	0,586	0,502	0,585	0,514	0,725	0,639	0,877	0,659
V_L	0,703	0,699	0,741	0,466	1,000	0,951	0,985	0,974	0,952	0,951	0,998	0,930	0,962	0,845	0,701	0,756	0,458
f_L	0,869	0,754	0,699	0,600	0,951	1,000	0,986	0,992	0,987	0,946	0,959	0,897	0,930	0,866	0,713	0,882	0,499
$f_{t,1}$	0,786	0,723	0,759	0,517	0,985	0,986	1,000	0,996	0,986	0,960	0,987	0,927	0,949	0,837	0,705	0,814	0,442
$f_{t,2}$	0,819	0,749	0,738	0,559	0,974	0,992	0,996	1,000	0,995	0,967	0,979	0,931	0,946	0,841	0,727	0,841	0,467
f_t	0,839	0,769	0,752	0,575	0,952	0,987	0,986	0,995	1,000	0,971	0,961	0,933	0,919	0,810	0,749	0,849	0,460
E_{Cu}	0,791	0,854	0,805	0,586	0,951	0,946	0,960	0,967	0,971	1,000	0,963	0,982	0,885	0,819	0,859	0,831	0,530
Z_{Uz}	0,730	0,732	0,746	0,502	0,998	0,959	0,987	0,979	0,961	0,963	1,000	0,944	0,961	0,860	0,728	0,783	0,480
f_{ct}	0,733	0,850	0,807	0,585	0,930	0,897	0,927	0,931	0,933	0,982	0,944	1,000	0,875	0,798	0,844	0,796	0,481
f_c	0,701	0,632	0,583	0,514	0,962	0,930	0,949	0,946	0,919	0,885	0,961	0,875	1,000	0,871	0,601	0,761	0,445
t_{AE}	0,797	0,769	0,476	0,725	0,845	0,866	0,837	0,841	0,810	0,819	0,860	0,798	0,871	1,000	0,677	0,889	0,701
$AE_{energie}$	0,698	0,952	0,676	0,639	0,701	0,713	0,705	0,727	0,749	0,859	0,728	0,844	0,601	0,677	1,000	0,743	0,704
ε^{-1}	0,975	0,872	0,536	0,877	0,756	0,882	0,814	0,841	0,849	0,831	0,783	0,796	0,761	0,889	0,743	1,000	0,639
σ^{-1}	0,576	0,706	0,206	0,659	0,458	0,499	0,442	0,467	0,460	0,530	0,480	0,481	0,445	0,701	0,704	0,639	1,000

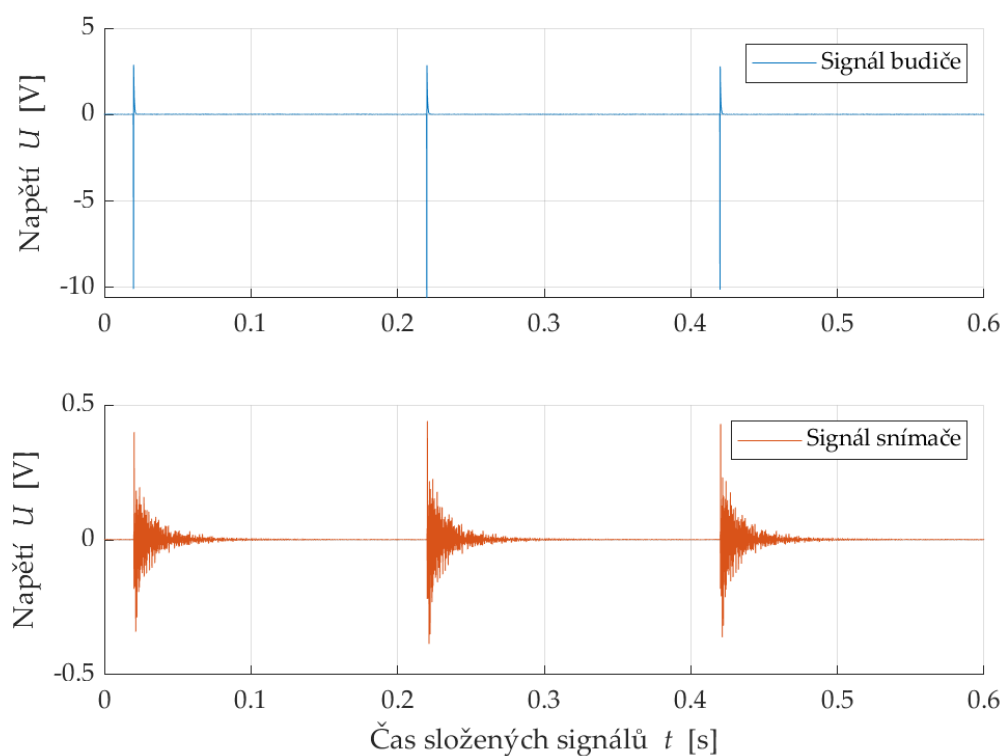
Tab. 19: Korelační koeficienty metod použitých při měření teplotních sad receptury D

-	T	ΔD	A	D	V_L	f_L	$f_{t,1}$	$f_{t,2}$	f_t	E_{cu}	Z_{uz}	f_{ct}	f_c	$\int V_P$
T	1,000	0,840	0,771	0,822	0,871	0,905	0,876	0,913	0,878	0,894	0,882	0,904	0,954	0,488
ΔD	0,840	1,000	0,714	0,930	0,720	0,738	0,687	0,737	0,698	0,795	0,746	0,791	0,736	0,151
A	0,771	0,714	1,000	0,543	0,917	0,880	0,879	0,875	0,861	0,931	0,919	0,91	0,817	0,132
D	0,822	0,930	0,543	1,000	0,615	0,636	0,582	0,641	0,607	0,658	0,640	0,659	0,695	0,492
V_L	0,871	0,720	0,917	0,615	1,000	0,988	0,989	0,987	0,985	0,970	0,999	0,962	0,958	0,140
f_L	0,905	0,738	0,880	0,636	0,988	1,000	0,996	1,000	0,993	0,971	0,989	0,972	0,976	0,178
$f_{t,1}$	0,876	0,687	0,879	0,582	0,989	0,996	1,000	0,996	0,996	0,957	0,986	0,957	0,967	0,344
$f_{t,2}$	0,913	0,737	0,875	0,641	0,987	1,000	0,996	1,000	0,992	0,968	0,987	0,97	0,981	0,195
f_t	0,878	0,698	0,861	0,607	0,985	0,993	0,996	0,992	1,000	0,940	0,983	0,938	0,969	0,166
E_{cu}	0,894	0,795	0,931	0,658	0,970	0,971	0,957	0,968	0,940	1,000	0,975	0,998	0,932	0,212
Z_{uz}	0,882	0,746	0,919	0,640	0,999	0,989	0,986	0,987	0,983	0,975	1,000	0,968	0,959	0,177
f_{ct}	0,904	0,791	0,910	0,659	0,962	0,972	0,957	0,970	0,938	0,998	0,968	1,000	0,938	0,05
f_c	0,954	0,736	0,817	0,695	0,958	0,976	0,967	0,981	0,969	0,932	0,959	0,938	1,000	0,521
$\int V_P$	0,488	0,151	0,132	0,492	0,140	0,178	0,344	0,195	0,166	0,212	0,177	0,05	0,521	1,000

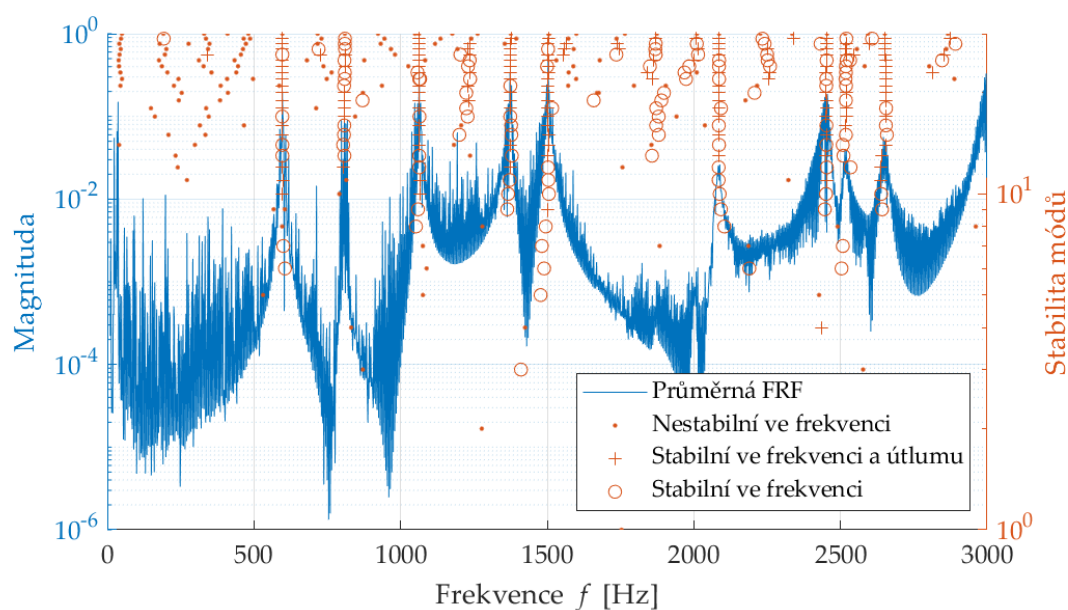
Tab. 20: Korelační koeficienty metod použitých při měření teplotních sad receptury E

-	T	ΔD	A	D	V_L	f_L	$f_{t,1}$	$f_{t,2}$	f_t	E_{cu}	Z_{uz}	f_{ct}	f_c
T	1,000	0,770	0,360	0,847	0,822	0,871	0,870	0,880	0,850	0,869	0,837	0,822	0,892
ΔD	0,770	1,000	0,581	0,950	0,721	0,765	0,742	0,748	0,744	0,849	0,756	0,771	0,640
A	0,360	0,581	1,000	0,459	0,688	0,652	0,623	0,620	0,640	0,673	0,690	0,709	0,484
D	0,847	0,950	0,459	1,000	0,722	0,786	0,746	0,776	0,769	0,851	0,757	0,762	0,716
V_L	0,822	0,721	0,688	0,722	1,000	0,991	0,991	0,991	0,991	0,964	0,998	0,970	0,950
f_L	0,871	0,765	0,652	0,786	0,991	1,000	0,990	0,997	0,997	0,984	0,995	0,981	0,963
$f_{t,1}$	0,870	0,742	0,623	0,746	0,991	0,990	1,000	0,994	0,989	0,969	0,992	0,967	0,960
$f_{t,2}$	0,880	0,748	0,620	0,776	0,991	0,997	0,994	1,000	0,996	0,974	0,994	0,966	0,974
f_t	0,850	0,744	0,640	0,769	0,991	0,997	0,989	0,996	1,000	0,978	0,993	0,975	0,965
E_{cu}	0,869	0,849	0,673	0,851	0,964	0,984	0,969	0,974	0,978	1,000	0,976	0,984	0,913
Z_{uz}	0,837	0,756	0,690	0,757	0,998	0,995	0,992	0,994	0,993	0,976	1,000	0,975	0,947
f_{ct}	0,822	0,771	0,709	0,762	0,970	0,981	0,967	0,966	0,975	0,984	0,975	1,000	0,909
f_c	0,892	0,640	0,484	0,716	0,950	0,963	0,960	0,974	0,965	0,913	0,947	0,909	1,000

11.5 Modální analýza – obecné grafy



Obr. 143: Znáznornění složených tří úderů budícím kladívkem a odezva zkušebního tělesa zaznamenaná snímačem zrychlení.

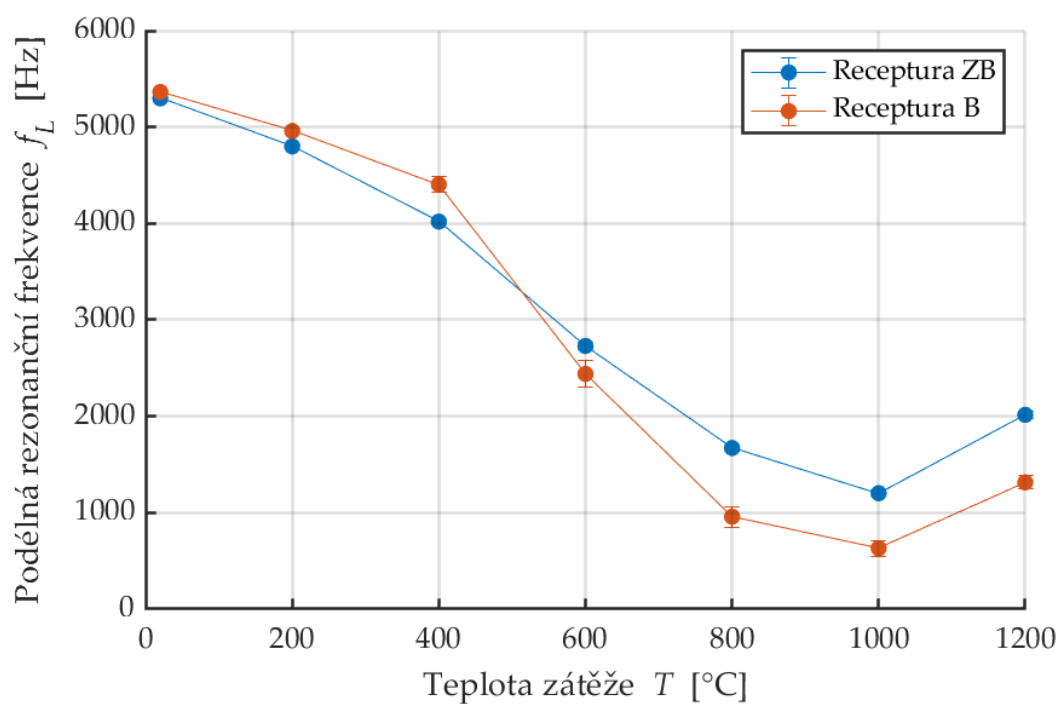


Obr. 144: Stabilizační diagram s analýzou vlastních frekvencí a útlumu s vyznačenými odhady vlastních frekvencí.

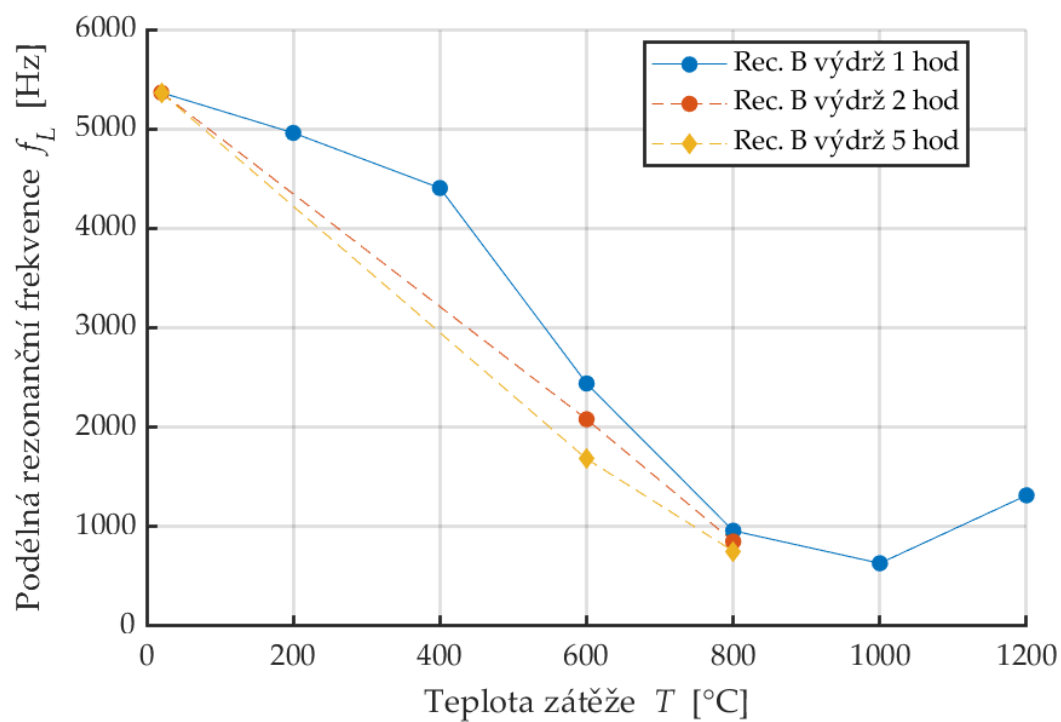
11.6 Testy na jednoduše vyztužených prvcích



Obr. 145: Uložení výztuže ve formě pro jednoduše vyztužená tělesa.



Obr. 146: Podélná rezonanční frekvence jednoduše vyztužených zkušebních trámů.



Obr. 147: Znáznornění rozdílu podélné rezonanční frekvence zkušebních těles při různé délce tepelné zadržce